

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg  
Fakultät für Chemie und Geowissenschaften  
Geographisches Institut

in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),  
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Oberpfaffenhofen  
Abteilung für Kriseninformationssysteme und Georisiken

Diplomarbeit

---

**Von der Einzel- zur Multi-Hazard-Analyse**

*Eine Untersuchung am Beispiel Cilacap, Java, Indonesien*

---

Gutachter:

Prof. Dr. Alexander Siegmund  
*Pädagogische Hochschule Heidelberg*

Dr. Joachim Post  
*Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Oberpfaffenhofen  
Abteilung für Kriseninformationssysteme und Georisiken*

Eingereicht am 19. November 2010 von

Matthias Rupp  
Luitpoldstraße 20  
82152 Krailling

Matrikelnummer 2410278

*Für Melanie, David und meine Eltern*

*Sebelum ajal berpantang mati*

*(Deine Stunde hat noch nicht geschlagen)*

*Leben und Sterben liegt in Gottes Hand,  
auch wenn die Gefahr noch so groß ist,  
wem die Stunde noch nicht schlägt,  
wird heil herauskommen.*

Indonesisches Sprichwort

## **Erklärung**

„Ich versichere, dass ich die beiliegende Diplomarbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.“

Oberpfaffenhofen, den 19. November 2010

---

Matthias Rupp

## Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung.....</b>	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>II</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>X</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Begrifflichkeiten und Definitionen .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Stand der Forschung im Bereich der Hazard-Analysen.....</b>	<b>6</b>
3.1 Die Einzel-Hazard-Analyse.....	6
3.1.1 Magnitude und Frequenz eines Naturereignisses .....	7
3.1.2 Die Methodik der Einzel-Hazard-Analyse .....	8
3.1.3 Die Hazard-Map als Ergebnis der Gefahrenanalyse .....	12
3.2 Die Multi-Hazard-Analyse .....	14
<b>4 Beschreibung des Untersuchungsgebietes.....</b>	<b>17</b>
4.1 Naturräumliche Gliederung.....	17
4.2 Die potentiellen Naturgefahren in Cilacap .....	20
4.2.1 Gravitative Massenbewegungen .....	21
4.2.2 Hochwasser .....	22
4.2.3 Erdbeben .....	23
4.2.4 Tsunamis .....	24
<b>5 Daten und Vorverarbeitung.....</b>	<b>26</b>
<b>6 Methoden der Hazard-Analysen zu Cilacap.....</b>	<b>33</b>
6.1 Die Methodik bei gravitativen Massenbewegungen.....	33
6.1.1 Problemstellung .....	33
6.1.2 Durchführung.....	35
6.2 Die Methodik bei Hochwasser .....	47
6.2.1 Problemstellung .....	47

6.2.2	Durchführung.....	49
6.3	Die Methodik bei Erdbeben.....	64
6.3.1	Problemstellung .....	64
6.3.2	Durchführung.....	67
6.4	Die Methodik bei Tsunamis .....	69
6.4.1	Problemstellung .....	69
6.4.2	Durchführung.....	70
6.5	Die Methodik der Multi-Hazard-Analyse.....	74
6.5.1	Problemstellung .....	74
6.5.2	Durchführung.....	75
<b>7</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>78</b>
7.1	Rutschungen .....	78
7.2	Hochwasser .....	82
7.3	Erdbeben .....	86
7.4	Tsunami.....	88
7.5	Multi-Hazard-Analyse.....	92
<b>8</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>95</b>
8.1	Gravitative Massenbewegungen.....	95
8.1.1	Ergebnis .....	95
8.1.2	Kritische Methodenreflexion .....	96
8.2	Hochwasser .....	99
8.2.1	Ergebnis .....	99
8.2.2	Kritische Methodenreflexion .....	102
8.3	Erdbeben .....	105
8.3.1	Ergebnis .....	105
8.3.2	Kritische Methodenreflexion .....	105
8.4	Tsunami.....	107
8.4.1	Ergebnis .....	107
8.4.2	Kritische Methodenreflexion .....	109
8.5	Multi-Hazard .....	111
8.5.1	Ergebnis .....	111
8.5.2	Kritische Methodenreflexion .....	113
<b>9</b>	<b>Die Wechselwirkungsanalyse als künftiger Ansatz der Multi-Hazard-Analyse?.....</b>	<b>116</b>
<b>10</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>118</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>122</b>
	<b>Internetquellen.....</b>	<b>130</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AWI	Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
BAKOSURTANAL	Badan Koordinasi Survei dan Pemetaan Nasional National Coordination Agency for Surveys and Mapping
BNPB	Badan Nasional Penanggulangan Bencana National Disaster Management Agency
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
DEM	Digital Elevation Model
DHM	Digitales Höhenmodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DIBI	Data dan Informasi Bencana Indonesia Daten und Informationen über indonesische Katastrophen
DTM	Digital Terrain Model
EERI	Earthquake Engineering Research Institute
EM-DAT	The International Disaster Database
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FAO	Food and Agriculture Organization
FME	Feature Manipulation Engine
GFZ	German Research Centre for Geosciences
GIS	Geographisches Informationssystem
GSHAP	Global Seismic Hazard Assessment Program
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
InaTEWS	Indonesia Tsunami Early Warning System
ITC	Inter Tropic Convergence
LIPI	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia Indonesian Institute of Science
LAPAN	Lembaga Penerbangan Dan Antariksa Nasional National Institute of Aeronautics and Space
NOAA	National Oceanic and Atmosphere Administration
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
STI	Soil Topographic Index
TI	Topographic Index

UNISDR	United Nations International Strategy For Disaster Reduction
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifikation der Methoden für Rutschungen nach ALEOTTI & CHOWDHURY (1999). Quelle: ALEOTTI & CHOWDHURY 1999, 26. ....	11
Abbildung 2: Die Beschreibung des methodischen Vorgehens sowie die Wechselwirkungen zwischen Rutschungen, Erdbeben, Tsunamis und Hochwasser. Quelle: Eigener Entwurf.....	13
Abbildung 3: Ein beispielhafter Weg der Multi-Hazard-Analyse. Quelle: verändert nach GREIVING et al. (2006), 13.....	14
Abbildung 4: Idealisierter Prozess der Kalibrierung von Experteneinschätzungen (A bis L) durch die Delphi-Methode. Quelle: verändert nach OLFERT et al. 2006, 129. ....	15
Abbildung 5: Das Untersuchungsgebiet Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	17
Abbildung 6: Die atmosphärische Zirkulation über Südostasien im Nordsommer/Südwinter (a) und im Nordwinter/Südsommer (b). Quelle: VORLAUFER 2009, 29.....	19
Abbildung 7: Klimadiagramm Semarang (Java), 3 m ü. NN., Niederschlagssumme 2603 mm, Jahresdurchschnittstemperatur 27,23 ° C. Daten: www.klimadiagramme.de. Quelle: Eigene Darstellung. ....	19
Abbildung 8: Die Anzahl der Naturereignisse in Indonesien zwischen 1815 und 2009. Quelle: DIBI.....	20
Abbildung 9: Anzahl der Hochwasserereignisse pro Jahr in Indonesien. Quelle: Hidayat 2009, 1. ....	22
Abbildung 10: Hangneigungskarte von Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	27
Abbildung 11: Die Landnutzung in Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	28
Abbildung 12: Die Böden in Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung... ..	29
Abbildung 13: Die Geologie in Cilacap. Die geologischen Einheiten wurden in der Darstellung stark generalisiert. Die Tabelle 4 enthält detaillierte Informationen zur Geologie. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	29
Abbildung 14: Störungslinien in Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	30
Abbildung 15: Beispiel für die Korrektur einer nicht passgenauen Digitalisierung anhand des Geologie-Shapefiles. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	31
Abbildung 16: Die durchschnittliche, erdbebenbedingte Bodenbeschleunigung auf Java. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	31
Abbildung 17: Anpassung der Gefährdungsbereiche an das Untersuchungsgebiet. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	32

Abbildung 18: Prozessbaum der einzelnen Analyseschritte. Erstellt mit dem Model Builder in ArcGIS. Quelle: Eigener Entwurf.....	44
Abbildung 19: Schematische Darstellung zur Berechnung der Fließrichtung (von links nach rechts): Höhenwerte im DHM, Fließrichtungscodierung, Fließrichtungsraster mit den jeweiligen Codes und die graphische Darstellung der Fließrichtung. Quelle: verändert nach NOAA.....	52
Abbildung 20: Schematische Darstellung zur Berechnung der Fließakkumulation (von links nach rechts): Fließakkumulationsraster mit den jeweiligen Codes und graphische Darstellung des Entwässerungsnetzes. Quelle: verändert nach NOAA.....	52
Abbildung 21: Vergleich des digitalisierten Flussnetzes mit der Fließakkumulation zur Auswahl eines Schwellenwertes durch einen iterativen Prozess. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	53
Abbildung 22: Die Logarithmusfunktion. Quelle: verändert nach Exbook.de.....	54
Abbildung 23: Der Topographische Index (TI). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	55
Abbildung 24: Der Bodentopographische Index (STI). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung .....	55
Abbildung 25: Links: Vergleich des STI (a) und TI (b) mit der versiegelten Fläche und der Hangneigung (c) am Beispiel der südöstlichen Küstenlinie Cilacaps. Rechts: Vergleich des Hillshades (d) mit dem STI (e). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	57
Abbildung 26: Vereinfachte, rechteckige Darstellung eines Flussbettes. Quelle: Engineering Toolbox.....	59
Abbildung 27: Schema des iterativen Prozesses: Anpassung der berechneten Querschnittsüberschwemmungsfläche an das DHM. Quelle: Eigene Darstellung.....	60
Abbildung 28: Hochwasserereignisse in Zentraljava/Cilacap. Quelle: verändert nach Dartmouth Flood Observatory.....	61
Abbildung 29: Hillshade des Untersuchungsgebietes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	62
Abbildung 30: Die durchschnittliche, erdbebenbedingte Bodenbeschleunigung in Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	68
Abbildung 31: Beispiele für verschiedene Erdbebenherde entlang des Sundagrabens. Quelle: verändert nach DLR/GTZ 2009, 16.....	72
Abbildung 32: Die Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen (Darstellung: Stretched, Histogramm-ausgleich). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	79
Abbildung 33: Gefahrenpotential durch Hangrutschungen als Ergebnis des Gewichtungs- und Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.....	80

Abbildung 34: TI-Intervalle zur Darstellung der fünf Gefahrenstufen für Hochwasser, basierend auf einem iterativen Prozess. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	83
Abbildung 35: Die fünf Gefahrenintervalle des topographischen Indexes. Projektion in WGS 1983 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	83
Abbildung 36: Gefahrenpotential durch Hochwasser als Ergebnis des Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	85
Abbildung 37: Gefahrenpotential durch Erdbeben als Ergebnis des Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	87
Abbildung 38: Eintrittswahrscheinlichkeiten für einen Tsunami in Cilacap (Darstellung: Stretched, Histogrammausgleich). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	88
Abbildung 39: Gefahrenpotential durch Tsunamis als Ergebnis des Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	90
Abbildung 40: Die Gefährdung durch Rutschungen, Hochwasser, Erdbeben und Tsunamis (Darstellung: Stretched, Histogrammausgleich). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	92
Abbildung 41: Gefahrenpotential durch Rutschungen, Hochwasser, Erdbeben und Tsunamis als Ergebnis des Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	93
Abbildung 42: Plausibilitätsprüfung der Gefährdungsbereiche mit dem Hillshade am Beispiel der südöstlichen Küste Cilapacs. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	100
Abbildung 43: Vergleich der Gefährdungsbereiche mit Überflutungskarten (Quelle: Dartmouth). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	101
Abbildung 44: Auswirkungen des Low-Pass-Filters. Links ohne Filter, rechts geglättet. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	101
Abbildung 45: Visueller Vergleich eines Satellitenbildes (2010, Cnes Spot Image, Quelle: Google Earth) und der Tsunamigefährdung. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	107
Abbildung 46: Vergleich des DEM mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten eines Tsunamis. Die markanten Bereiche sind rot hervorgehoben. Die blauen Bereiche enthalten Datenfehler im DEM, was die fehlerhafte Darstellung erklärt. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung. ....	108
Abbildung 47: Vergleich der vier Einzel-Hazard-Analyseergebnisse: (a) Rutschungen, (b) Hochwasser, (c) Erdbeben, (d) Tsunami. Die Markierungen stellen markante Punkte in der Multi-Hazard-Map (Abbildung 40) dar. Quelle: Eigene Darstellung. ....	112

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gewichtung der Parameter .....	37
Tabelle 2: Scoring der Hangneigung .....	38
Tabelle 3: Scoring der Landnutzung .....	38
Tabelle 4: Scoring der Geologie .....	39
Tabelle 5: Scoring der Böden .....	40
Tabelle 6: Scoring der Störungslinien (Buffer) .....	43
Tabelle 7: Die durchschnittliche, erdbebenbedingte Bodenbeschleunigung auf Java. Quelle: Eigener Entwurf. .	68
Tabelle 8: InaTEWS Warnstufen. Quelle: DLR/GTZ 2009, 11. ....	70
Tabelle 9: Dokumentierte Anzahl der unterschiedlichen Naturereignisse, dargestellt in unterschiedlichen Zeitreihen zur Veranschaulichung der Datenlücken. Quelle: Eigener Entwurf. Daten: BNPB. ....	77
Tabelle 10: Referenzzeiträume der jeweiligen Naturereignisse, die zur Extrapolation der Datenlücken verwendet werden. Quelle: Eigener Entwurf. ....	77
Tabelle 11: Extrapolierte Anzahl an Naturereignissen zwischen 1924 und 2009 und die daraus berechnete Gewichtung. Quelle: Eigener Entwurf. ....	77
Tabelle 12: Gefahrenintervalle für gravitative Massenbewegungen, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen. Quelle: Eigener Entwurf. ....	78
Tabelle 13: Intervalle des topographischen Indexes und Zuweisung des Scorings, basierend auf der Standardabweichung. Quelle: Eigener Entwurf. ....	82
Tabelle 14: Gefahrenintervalle für Hochwasser, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen. Quelle: Eigener Entwurf. ....	84
Tabelle 15: Gefahrenintervalle für die durchschnittliche Bodenbeschleunigung, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen. Quelle: Eigener Entwurf. ....	86
Tabelle 16: Intervalle der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Zuweisung des Scorings, basierend auf den empirisch ermittelten minimalen und maximalen Eintrittswahrscheinlichkeiten für einen Tsunami in Indonesien. Quelle: Eigener Entwurf. ....	89
Tabelle 17: Gefahrenintervalle für Tsunamis, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen. Quelle: Eigener Entwurf. ....	89
Tabelle 18: Gefahrenintervalle der Multi-Hazard-Analyse, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen. Quelle: Eigener Entwurf. ....	92
Tabelle 19: Die Wahrscheinlichkeitsmatrix der Wechselwirkungsanalyse. Quelle: verändert nach UNITED NATIONS UNIVERSITY 1994, 7. ....	116

## **Zusammenfassung**

In der vorliegenden Arbeit werden für die indonesische Regentschaft Cilacap zunächst *Einzel-Hazard-Analysen* zu unterschiedlichen Naturgefahren durchgeführt, um anschließend zu einer *Multi-Hazard-Analyse* zu gelangen, die das gesamte Naturgefahrenrisikopotential der Region beinhaltet. Gravitative Massenbewegungen, Hochwasser, Erdbeben und Tsunamis bedrohen sowohl wirtschaftliche Güter als auch den Menschen und sind Gegenstand der Untersuchung.

Zur Gefahreneinschätzung von Rutschungen wird ein Dispositionsmodell angewendet, das ein digitales Höhenmodell, geologische, pedologische, tektonische sowie Landnutzungsdaten einbezieht. Die Hochwasseranalyse erfolgt auf Grund eines Mangels an hydrologischen und meteorologischen Daten mit Hilfe eines topographischen Indexes (TI), der hydrologische Gegebenheiten eines Gebietes in ihren Grundzügen zu erfassen vermag. Es handelt sich um einen deterministischen Ansatz, der auf der Verbindung von Topographie und Strömungsrichtung in Zeit und Raum basiert. Die Anwendung des bodentopographischen Indexes (STI) – eine Erweiterung des TI, die in dieser Arbeit zur Unterscheidung zwischen versiegelten und unbebauten Flächen herangezogen wurde – erbrachte hingegen fehlerhafte Ergebnisse. Die Erdbebengefährdung wird durch die durchschnittliche Bodenbeschleunigung in der Region Javas ermittelt. Eine Analyse der Tsunamigefährdung wurde seitens des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Form einer komplexen Simulation der Eintrittswahrscheinlichkeiten durchgeführt und in diese Arbeit implementiert. Die Parameter jeder Analyse werden einem Scoring von 1 (geringe Gefährdung) bis 5 (hohe Gefährdung) unterzogen. Auf dieser Basis lassen sich die Ergebnisse im Anschluss kombinieren.

Die Analyse der gravitativen Massenbewegungen erlaubt eine plausible Identifizierung gefährdeter Bereiche in Cilacap, die insbesondere im Bereich erhöhten Reliefs zu finden sind. Die Flussläufe und Niederungen in Cilacap weisen das höchste Gefahrenpotential für Hochwasser auf. Die Erdbebengefährdung für Cilacap ist als gering bis mittel einzuschätzen und zeigt eine tendenzielle Steigerung der Gefährdung in südwestlicher Richtung. Die Gefahr durch Tsunamis ist – in relativer Betrachtung zur gesamten indonesischen Küste – als gering einzustufen, betrifft im Falle eines Ereignisses allerdings die gesamte Küste Cilacaps. Lediglich die Halbinsel *Nusakambangan Island* weist auf Grund eines höheren Reliefs keine Gefährdung auf.

Die Multi-Hazard-Analyse wird in Form einer *Aggregated Hazard Map* erstellt. Die Ergebnisse der Einzel-Hazard-Analysen werden aggregiert und erfahren anhand der Häufigkei-

ten der jeweiligen Naturereignisse in der Region eine Gewichtung. Die Herausforderung der Multi-Hazard-Analyse liegt in der Einschätzung der Wechselwirkungen verschiedenster Naturereignisse. Sowohl Erdbeben als auch heftige Niederschläge können Rutschungen auslösen. Hinzu kommen niederschlagsbedingte Hochwasser, die ihrerseits für Rutschungen ursächlich sein können. Erdbeben können neben der Erschütterung des Erdbodens auch Tsunamis verursachen, was wiederum Hochwasser und Rutschungen nach sich ziehen kann. Die Abhängigkeiten sind kaum zu erfassen, schwierig zu modellieren und bleiben in der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt.

Die Multi-Hazard-Map lässt die Aussage zu, dass in Cilacap von den Bereichen mit höherem Relief das höchste Gefahrenpotential für das Eintreten eines Naturereignisses ausgeht. Allerdings darf die potentielle Gefahr, beispielsweise im nördlichen Becken sowie entlang der Küste, nicht unterschätzt werden. Im Vergleich mit den Ergebnissen der Einzel-Hazard-Analysen erscheinen diese Bereiche durch eine Kombination aller Gefahrenkarten als gering gefährdet, jedoch kehrt sich dieses Bild bei der Betrachtung der einzelnen Gefahrenkarten um.

Die Ergebnisse der Einzel-Hazard-Analysen sind sowohl Grundlage der Multi-Hazard-Analyse als auch notwendiges Mittel zur Interpretation der *Multi-Hazard-Map*. Weder das Gebiet noch das Naturereignis mit der höchsten Gefährdung vermag das Ergebnis in Form der Multi-Hazard-Map eindeutig zu identifizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass jedes Naturereignis ein spezifisches und räumliches Gefahrenpotential birgt, weshalb keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann. Die Durchführung der Einzel-Hazard-Analysen und der Multi-Hazard-Analyse führt zu dem Schluss, dass die Multi-Hazard-Map – zumindest nach der in dieser Arbeit angewandten Methode – nicht als autonomes Instrument zur Ausweisung gefährdeter Regionen herangezogen werden kann. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um das Potential der Multi-Hazard-Map durch eine Anpassung der methodischen Parameter zu prüfen.

## Abstract

In the presented study *single-hazard-analyses* for different natural events are executed for the regency of Cilacap, Java, Indonesia, to get to a *multi-hazard-analysis* which contains the whole natural hazard capability of the region. Mass movements, floods, earthquakes and tsunamis threaten both economic commodities and human beings and are object of study.

A disposition model is used for hazard estimation of mass movement. It includes a digital elevation model, geologic, pedologic, tectonic and land use data. The analysis of floods is based on a topographic index (TI) because of a lack of both hydrological data and meteorological measurements. It has the ability to acquire the hydrological characteristics of an area. The TI is a deterministic approach that is based on the link of slope and flow direction in time and space. Whereas the application of a soil topographic index (STI) – an extension of TI that is consulted in the study to distinguish between sealed and unsealed area – devotes false results in the study area. The earthquake hazard for Cilacap is extracted from a map which contains the average of peak ground acceleration of Java. The analysis of tsunami hazard is executed by the Alfred-Wegener-Institute (AWI) and the German Aerospace Center (DLR). The complex simulation of probabilities of occurrence is implemented in the current study. The parameters of each analysis get a scoring between 1 (low hazard) and 5 (high hazard) so that the results are able to be combined in the next step.

The analysis of mass movement reveals a reasonable identification of hazardous areas in Cilacap that are especially in the areas of higher relief. The courses of rivers and lowlands show the highest risk for floods. The hazard of earthquakes is estimated as low to moderate and indicates an increasing of risk towards the southwest of Java. Tsunamis show – in relative terms to the whole coastline of Indonesia – a low risk. Nevertheless in case of occurrence the entire coastline of Cilacap is threatened. Only the peninsula *Nusakambangan Island* offers no hazardous areas because of higher relief.

The multi-hazard-analysis is compiled as an *aggregated hazard map*. The results of single-hazard-analyses are aggregated and weighted, based on the frequencies of the respective natural event occurrences in the study area. The challenge of multi-hazard-analysis is the estimation of correlations between several natural events. Both earthquakes and heavy rainfall may cause mass movements. Additionally there are floods caused by precipitation. Floods in turn may trigger mass movements. Earthquakes do not only shake the ground, they are also able to cause tsunamis that trigger floods and mass movements on the other hand. Interactions are barely to distinguish and difficult to simulate. In the current study they are disregarded.

The multi-hazard map reveals the highest risk of occurrence of natural events in areas of higher relief. However the potential hazard – e.g. in the northern depression and along the coastline – has to be considered. In comparison with the results of single-hazard-analyses these areas, caused by an aggregation of the different single-hazard maps, reveal a lower risk, but it changes if the single-hazard maps will be regarded lonely.

The results of single-hazard-analyses are both basis and essential medium for interpretation of the multi-hazard map. Neither the area nor the natural event with the highest hazard can be identified only by the multi-hazard map. The results offer that each natural event contains a specific and spatial hazard capability. Therefore a universal designation cannot be made. The execution of both the single-hazard-analyses and the multi-hazard-analysis carries to the conclusion that the multi-hazard map – at least concerning the method of the present study – cannot be appropriated for pointing out hazardous areas as an autonomic tool. Further investigations are necessary to improve the potential of the multi-hazard map by adjustment of parameters in the method.



## 1 Einleitung

Die Insel Java auf Indonesien ist unablässig von Naturereignissen bedroht. Die tektonischen Gegebenheiten entlang einer Subduktionszone führen zur Ausbildung gefährlicher Vulkane, magmatische und tektonische Erdbeben haben neben den eigentlichen Erschütterungen gravitative Massenbewegungen und Tsunamis zur Folge. Zudem führen heftige Regenfälle in der Regenzeit zu Rutschungen und Hochwassern (MARFAI et al. 2008, 336ff.). Naturereignisse bedrohen sowohl wirtschaftliche als auch private Güter und gefährden Menschenleben.

Die Regentschaft Cilacap in Zentraljava (*Jawa Tengah*) unterliegt der ständigen Gefahr durch Naturereignisse. Hierzu zählen insbesondere Rutschungen, Hochwasser, Erdbeben und Tsunamis. Auf Grund des hohen Gefahrenpotentials erfahren präventive Maßnahmen zunehmende Bedeutung. Wie wird ein solches Gefahrenpotential abgeschätzt? Die Antwort liegt in der *Hazard-Analyse*. In der vorliegenden Arbeit werden *Einzel-Hazard-Analysen* zu unterschiedlichen Naturgefahren in Cilacap durchgeführt, um schließlich zu einer *Multi-Hazard-Analyse* zu gelangen, die das gesamte Naturgefahrenrisikopotential<sup>1</sup> der Region abbildet.

Naturereignisse weisen nichtlineare Zusammenhänge auf. Sowohl Erdbeben als auch heftige Niederschläge können Rutschungen auslösen. Hinzu kommen niederschlagsbedingte Hochwasser, die ihrerseits für Rutschungen ursächlich sein können. Erdbeben erschüttern nicht nur den Erdboden, sondern können auch Tsunamis verursachen, was wiederum zu Hochwasser und Rutschungen führen kann. Die Wechselwirkungen sind kaum vorhersehbar und äußerst vielseitig – und daher methodisch entsprechend schwierig zu erfassen. Mit welchen Methoden werden solche Analysen gegenwärtig durchgeführt? Inwiefern unterscheiden sich einfache Hazard-Analysen von Multi-Hazard-Analysen? Wo liegen Stärken und Schwächen der verwendeten Ansätze?

Auf Grund einer mangelnden Einheitlichkeit innerhalb der Literatur (HUABIN et al. 2005, 550) werden zunächst in Kapitel 2 die grundlegenden Begriffe definiert und die unterschiedlichen Bedeutungen aufgezeigt. Anschließend werden in Kapitel 3 der aktuelle Forschungsstand der Hazard-Analysen wiedergegeben, diverse Methoden erläutert sowie deren Probleme und Grenzen aufgezeigt. Im Anschluss wird in Kapitel 4 das Untersuchungsgebiet Cilacap beschrieben. Für die naturräumliche Gliederung stehen physisch-geographische und geologi-

---

<sup>1</sup> Mit dieser Gefahrenanalyse sollen potentielle Naturereignisse im Raum erfasst werden. Es handelt sich *nicht* um eine Vulnerabilitätsanalyse, bei der in Abhängigkeit der Besiedlung und der wirtschaftlichen Nutzung einer Region das wirtschaftliche Risiko beziehungsweise das potentielle Schadensausmaß geschätzt wird.

sche Charakteristika im Vordergrund. Zudem werden Ursachen und Auswirkungen der relevanten Naturereignisse in Kürze dargestellt. Nach einer Dokumentation der Daten in Kapitel 5 folgen jeweils die Problemstellung und Durchführung sowohl der Einzel-Hazard-Analysen als auch der Multi-Hazard-Analyse in Kapitel 6. Die Ergebnisse werden anschließend in Kapitel 7 kartographisch präsentiert und beschrieben. In Kapitel 8 werden die Ergebnisse und Methoden interpretiert und diskutiert. So wird die These geprüft, dass das Ergebnis der Multi-Hazard-Analyse ohne die jeweils isolierte Betrachtung der einzelnen Naturereignisse nur bedingt signifikante Aussagen über die Gefährdung eines Gebietes zulässt. Zudem wird mit Hilfe der Multi-Hazard-Analyse die Frage beantwortet, welches Naturereignis für Cilacap das höchste Gefahrenpotential birgt.

## 2 Begrifflichkeiten und Definitionen

Aus der Fülle wissenschaftlicher Disziplinen, die sich mit der Thematik der Naturgefahren beschäftigen, ergeben sich enorme begriffliche Unterschiede (ELVERFELDT et al. 2008, 31), die im Folgenden grundlegend gegenübergestellt werden.

Erdbeben, Tsunamis, Rutschungen etc. werden als *Naturereignis* bezeichnet, wenn sie als natürliche Ereignisse keine Bedrohung für den Menschen oder ihr Eigentum darstellen. Bei einer Bedrohung für die Gesellschaft handelt es sich um eine *Naturgefahr*. Die Gefahr wird in den Naturwissenschaften „*als Eintretenswahrscheinlichkeit eines potentiell schadenbringenden Ereignisses in einem bestimmten Raum, einer bestimmten Zeit und mit einer bestimmten Magnitude definiert*“ (ELVERFELDT et al. 2008, 31, alte Rechtschreibung korrigiert). Problematisch wird es bei der Gegenüberstellung deutscher und englischer Fachaufsätze. In der englischen Sprache werden die Begriffe *risk* und (*natural-*) *hazard* unterschieden, während *hazard* ebenso wie *risk* in der deutschen Sprache schlichtweg als Risiko übersetzt wird. ALCÁNTARA-AYALA (2002) bezeichnet *hazard* als „*the result of sudden changes in long-term behavior caused by minute changes in the initial conditions*“ (ALCÁNTARA-AYALA 2002, 109). Nach FELL et al. (2008) sei *hazard* „*a condition with the potential for causing an undesirable consequence*“ (FELL et al. 2008, 97). HUABIN et al. (2005) zitieren folgende Definition für den Begriff *natural hazard*, der zur deutschen Definition einer Naturgefahr äquivalent ist: „*a natural hazard [...] as the probability that a reasonably stable condition may change abruptly*“ or „*as the probability that a potential damaging phenomenon may occur within a given area in a given period of time*“ (HUABIN et al. 2005, 549). MERZ (2006) setzt Risiko mit Gefahr gleich, da Risiko die Möglichkeit bezeichne, einen Schaden zu erleiden (MERZ 2006, 13).

Die Funktion aus der Gefahr und ihrer möglichen Konsequenzen ergibt das *Risiko* (ELVERFELDT et al. 2008, 31). FELL et al. (2008) hingegen beschreiben Risiko als das Produkt von Wahrscheinlichkeit und Konsequenzen, während der Begriff Gefahr als „*the natural phenomenon that could lead to damage, described in terms of its geometry, mechanical and other characteristics*“ definiert wird. Demgegenüber sei die *Wahrscheinlichkeit* „*an estimate of the likelihood of the magnitude of the uncertain quantity, or the likelihood of the occurrence of the uncertain future event*“ und die Konsequenzen „*the outcomes or potential outcomes arising from the occurrence of [a natural phenomenon] expressed qualitatively or quantitatively, in terms of loss, disadvantage or gain, damage, injury or loss of life*“ (FELL et al. 2008, 97). Demnach sind die Begriffe Gefahr und Wahrscheinlichkeit nicht äquivalent zu

verwenden. Nach MERZ (2006) beinhaltet der Begriff Risiko die Aspekte Eintrittswahrscheinlichkeit und die Größe eines Schadens (MERZ 2006, 13). KUMPULAINEN (2006) definiert Risiko als die Kombination aus Hazardpotential und Vulnerabilität (KUMPULAINEN 2006, 66). *Vulnerabilität* wird weiterhin als „*the degree of loss to a given element or set of elements within the area affected*“ beschrieben (FELL et al. 2008, 97; MERZ 2006, 11). Letztendlich definieren FELL et al. (2008) Risiko als „*a measure of the probability and severity of an adverse effect of health, property or the environment*“ (FELL et al. 2008, 97). Es ist ersichtlich, dass die Definitionen voneinander abweichen und Begriffe beinhalten, die ihrerseits definiert werden müssen.

Ein tatsächlich eingetretenes Naturereignis, bei dem hohe Verluste an Menschenleben oder materiellen Gütern entstehen, wird als *Naturkatastrophe* bezeichnet (ELVERFELDT et al. 2008, 31). Diese Definition entspricht der von ALCÁNTARA-AYALA (2002): „*A natural disaster can be defined as some rapid, instantaneous or profound impact of the natural environment upon the socio-economic system [...], or as a suddenly disequilibrium of the balance between the forces released by the natural system and the counteracting forces of the social system. The severity of such disequilibrium depends on the relation between the magnitude of the natural event and the tolerance of human settlements to such an event*“ (ALCÁNTARA-AYALA 2002, 112). Aus den Definitionen geht hervor, dass Präsenz und Landnutzung des Menschen ein Naturereignis zu einer Naturgefahr beziehungsweise einer Naturkatastrophe machen (ALCÁNTARA-AYALA 2002, 107). Die Münchener Rückversicherung beruft sich auf die Definition der Vereinten Nationen, die konkrete Zahlen hinzufügt. Dieser Definition zufolge handelt es sich um eine Naturkatastrophe, wenn die Selbsthilfefähigkeit der betroffenen Region deutlich überstiegen ist und überregionale oder internationale Hilfe erfordert. Dies ist der Fall, wenn die Zahl der Todesopfer 2.000, oder die der Obdachlosen 200.000 übersteigt, beziehungsweise die wirtschaftlichen Schäden 5 Prozent des Bruttoinlandsproduktes pro Kopf des betroffenen Landes überschreitet (WIRTZ 2009, 35).

In der vorliegenden Arbeit sind insbesondere die Begriffe risk und hazard von Bedeutung. Im folgenden Text gelten die Definitionen der UNISDR-Terminologie. Der zufolge sei hazard „*a dangerous phenomenon, substance, human activity or condition that may cause loss of life, injury or other health impacts, property damage, loss of livelihoods and services, social and economic disruption, or environmental damage*“ (UNISDR 2009, 17). Natural hazard bezeichnet einen „*natural process or phenomenon that may cause loss of life, injury or other health impacts, property damage, loss of livelihoods and services, social and economic disruption, or environmental damage*“ (UNISDR 2009, 20). Dabei sei natural hazard ein Sub-

begriff des Hazardbegriffs. Natural hazards können darüber hinaus durch ihre Magnitude, Intensität oder Dauer charakterisiert werden (UNISDR 2009, 21). Risiko beziehungsweise risk ist „*the combination of the probability of an event and its negative consequences*“ (UNISDR 2009, 25). Die UNISDR differenziert Risiko weiter in diverse Subbegriffe, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird (vgl. UNISDR 2009, 25f.).

Im folgenden Kapitel wird der gegenwärtige Stand der Forschung im Bereich der Hazardanalysen dargelegt.

### 3 Stand der Forschung im Bereich der Hazard-Analysen

Die Einzel-Hazard-Analyse hat sich durch ihre einfache Anwendbarkeit bewährt, doch die Vernachlässigung der internen und externen Komplexität verschiedenster (Natur-) Ereignisse sowie deren nichtlineare Wechselwirkungen fordern zunehmend anspruchsvollere Analysen. Eine Möglichkeit liegt in der Multi-Hazard-Analyse. Die gegenwärtige Wissenschaft im Bereich der Gefahrenanalysen weist eine Vielzahl von unterschiedlichen und kombinierten Ansätzen auf, deren Verfahren sowie Vor- und Nachteile im folgenden Kapitel skizziert werden.

#### 3.1 Die Einzel-Hazard-Analyse

Die Naturgefahren- beziehungsweise Hazard-Analyse bildet einen Teil der naturwissenschaftlichen Risikoanalyse (ELVERFELDT et al. 2008, 36). FELL et al. (2008) und die AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY (2007) beschreiben die Hazard-Analyse auch als Anfälligkeitsanalyse, welche die Einstufung, das Flächenausmaß und die räumliche Verteilung von bestehenden und potentiellen Naturereignissen im Untersuchungsgebiet prüft (Fell et al. 2008, 86; AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY 2007, 16).

Die Ergebnisse der Analysen werden kartographisch dargestellt und sollen Antworten auf folgende Fragen geben: „*Was könnte passieren?*“ und „*Was könnte wo und/oder wann und wie häufig passieren?*“ Während die Naturrisikoanalyse auch Informationen zu den Auswirkungen integriert, betrachtet die Naturgefahrenanalyse lediglich die Prozessabläufe eines natürlichen Ereignisses. Um eine Hazard-Analyse durchzuführen, müssen diese Prozesse und ihre geophysikalischen Parameter bekannt sein (ELVERFELDT et al. 2008, 35; FELL et al. 2008, 92; HUABIN et al. 2005, 549).

Die Naturgefahrenanalyse setzt sich aus der Gefährdungsanalyse und der Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen einer gewissen *Magnitude* zusammen. ELVERFELDT et al. (2008) verweisen auf einige Probleme, die sich bei der Übertragung technischer Risikoansätze auf Naturgefahren ergeben: Natürliche Prozesse sind dauerhaft vorhanden und werden erst mit dem Überschreiten einer gewissen Toleranzgrenze der *Intensität* (s. Kapitel 3.1.1) zu einer Gefahr. Zudem seien Naturgefahren das Resultat eines raumzeitlichen Vorgangs, weshalb die Identifikation einer (einzelnen) signifikanten Quelle als Ursache häufig nicht möglich sei (ELVERFELDT et al. 2008, 35f.).

### 3.1.1 Magnitude und Frequenz eines Naturereignisses

Die *Magnitude* gibt die Intensität eines Ereignisses an. Die *Frequenz* hingegen beschreibt eine bestimmte Wiederholungsperiode eines Ereignisses, die mit der durchschnittlichen Dauer zwischen zwei Ereignissen einer bestimmten Intensität berechnet werden kann. Die Häufigkeit gibt gleichzeitig Aufschluss über die Eintretenswahrscheinlichkeit. Frequenz und Magnitude sind in der Gefahrenbeurteilung von wesentlicher Bedeutung. Ein potentiell schadenbringendes Ereignis ist umso größer einzuschätzen, je größer dessen Intensität ist und je häufiger und somit wahrscheinlicher ein solches auftritt. Genaue Angaben zur Frequenz sind jedoch kaum möglich, vor allem nicht für Aussagen über Szenarien des Prozessverhaltens. SCHROTT & GLADE (2008) zufolge sei es bisher nicht möglich, eine Frequenz für diverse Magnituden zu definieren und diese damit zu prognostizieren. Naturereignisse lassen sich nach unterschiedlichen Skalen objektiv einer Magnitude zuweisen. Beispielsweise erhalten Erdbeben eine Magnitude nach der Richter- oder Mercalli-Skala und Wirbelstürme eine Magnitude auf der Saffir-Simpson-Skala. Doch trotz gleicher Intensitäten können Naturereignisse in Abhängigkeit der Pufferungskapazitäten der Ökosysteme und der gesellschaftlichen Vulnerabilität ein unterschiedliches Risiko bergen. Das Risiko kann durch ein potentiell erhöhtes Schadensausmaß steigen (SCHROTT & GLADE 2008, 134f.). Allerdings kann diese Einschränkung für die Gefahrenanalyse an dieser Stelle vernachlässigt werden.

Das Frequenz-Magnituden-Konzept ist seit den 1960er Jahren in der geomorphologischen Forschung etabliert, da sich Prozessmuster, Veränderungen von Reliefformen oder auch konzeptionelle Vorstellungen zur Reliefentwicklung erklären lassen. Der Ansatz ist jedoch eingeschränkt durch episodische Prozesse und Nichtlinearitäten in natürlichen Systemen (SCHROTT & GLADE 2008, 133), die keiner signifikanten Regelmäßigkeit unterliegen.

Dennoch stellt sich die Frage, weshalb und zu welcher Zeit solche Ereignisse auftreten. Jedes System weist gewisse systeminterne (z.B. Scherspannungen im Gestein oder das Porenvolumen des Bodens) und externe (z.B. hohe Niederschläge oder Erdbeben) Schwellenwerte auf, die in enger Wechselwirkung stehen und ein Maß für die Belastbarkeit des Systems darstellen. Ein Extremereignis tritt ein, wenn diese Schwellenwerte überschritten werden (SCHROTT & GLADE 2008, 136). Anhand der Komplexität der Wechselwirkungen wird die Notwendigkeit einer Multi-Hazard-Analyse deutlich.

Zudem verändern solche Ereignisse die gesamte Systemdynamik, was durch Modelle nicht erfasst werden kann und diese somit erheblich einschränkt. Die Schwellenwerte sind charakteristisch für nichtlineare Systeme (SCHROTT & GLADE 2008, 136). Folglich ist die

Verlässlichkeit einer Frequenz-Magnituden-Beziehung von variierenden Systemvariablen abhängig und kann daher nicht als statisch betrachtet werden (SCHROTT & GLADE 2008, 139). Dies zeigt gleichzeitig die Problematik sowohl der Einzel-Hazard- als auch der Multi-Hazard-Analysen. Wechselwirkungen im System lassen sich nicht vorhersagen und folglich kaum modellieren.

### **3.1.2 Die Methodik der Einzel-Hazard-Analyse**

Vorhersagemodelle beruhen meist auf der Statistik, dass künftige Ereignisse mit hoher Wahrscheinlichkeit unter gleichen Ausgangsbedingungen auftreten, wie es bei vergangenen Ereignissen der Fall war. Die Methode folgt dem Prinzip „*Vergangenheit und Gegenwart sind der Schlüssel zur Zukunft*“ (HUABIN et al. 2005, 550; HADMOKO et al. 2008, 7; CARRARA et al. 1999, 126). Dabei wird allerdings weitgehend angenommen, dass sich die kausalen Faktoren im Laufe der Zeit nicht signifikant verändern (HADMOKO et al. 2008, 7), obgleich vergangene Ereignisse das Potential für künftige verringern können (FELL et al. 2008, 93) – beispielsweise durch Abtransport von Material im Rahmen gravitativer Massenbewegungen.

HUABIN et al. (2005) zufolge werden gewöhnlich geomorphologische Risikokarten erstellt, historische Aufzeichnungen analysiert, heuristische oder indexbasierte, funktionelle oder statistische Methoden verwendet. Es gäbe zumindest im Bereich der Hangrutschungsanalysen keine kritische Gegenüberstellung diverser Ansätze. Die Auswahl einer Methode hänge in erster Linie von dem Untersuchungsgebiet und dem ausgewählten Maßstab ab. Bei einem Maßstab von 1:20.000 sind beispielsweise mikrotopographische Bedingungen kaum noch zu erkennen. Kleinräumige Veränderungen nehmen allerdings wesentlichen Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses (HUABIN et al. 2005, 551).

Nach ELVERFELDT et al. (2008) kann die Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Naturereignissen mit Hilfe von historischen Zeitreihen, Experteneinschätzungen, Hangstabilitätsmodellierungen und Frequenz-Magnitude-Analysen durchgeführt werden. Des Weiteren können Wiederkehrintervalle der auslösenden Ereignisse betrachtet werden. Beispielsweise Intervalle von Niederschlägen bestimmter Höhe als Auslöser von Rutschungen, Hochwassern oder Murgängen. Bei Murgängen muss zudem ausreichend Sediment vorhanden sein. Wurde dieses ausgespült, so sinkt die Eintrittswahrscheinlichkeit künftiger Ereignisse trotz hoher Niederschläge. Daher müssen sämtliche Einflussfaktoren eines spezifischen Naturereignisses berücksichtigt werden (ELVERFELDT et al. 2008, 36). Hinzu kommt die Gewichtung der ein-



zelen Faktoren, je nachdem wie groß ihr ursächlicher Einfluss auf ein Ereignis geschätzt wird (HADMOKO et al. 2008, 3, 10). Die Gewichtung der einzelnen Parameter wird bei den nachfolgenden Analysen ausführlich dargestellt.

Grundlegend sind qualitative, quantitative (HADMOKO et al. 2008, 3; ALEOTTI & CHOWDHURRY 1999, 26) und probalistische Methoden (SPANGENBERGER 2008, 13) zu unterscheiden. Die Auswahl der Methode hängt vom gewünschten Resultat sowie der Verfügbarkeit und Qualität der Daten ab. Gewöhnlich werden qualitative Methoden herangezogen, wenn die verfügbaren Daten hinsichtlich eines bestimmten (großen) Gebiets unzureichend sind. Demgegenüber stehen quantitative Methoden für standortbezogene Untersuchungen (HADMOKO et al. 2008, 3).

Im Folgenden wird ersichtlich, dass sowohl die Auswahl an Methoden als auch deren Beschreibung und Einteilung vielfältig sind. Während beispielsweise SPANGENBERGER (2008) zwischen qualitativen, deterministischen und probalistischen Ansätzen unterscheidet, ordnen ALEOTTI & CHOWDHURRY (1999) probalistische Ansätze unter anderem den quantitativen Methoden zu. HADMOKO et al. (2008) differenzieren lediglich zwischen qualitativen und quantitativen Methoden. Eine weitere Einteilung nach HUABIN et al. (2005) erfolgt z.B. durch die Begriffe der heuristischen und statistischen Analysen. Hinzu kommen solche, die auf sogenannten Inventaren basieren. Je nach Betrachtungsmaßstab sind spezifische Untersuchungsmethoden erforderlich (ELVERFELDT et al. 2008, 36). CASCINI (2008) unterteilt die Methoden in einfache, mittlere und komplexe Modelle.

Es gibt verschiedene Methoden, um Naturrisiken qualitativ oder quantitativ zu analysieren (ELVERFELDT et al. 2008, 31). HUABIN et al. (2005) stellt drei wesentliche Methoden zur GIS-basierten Erfassung von Rutschungen vor: die heuristische, die statistische und die deterministische Analyse (HUABIN et al. 2005, 557), welche auch auf andere Prozessbereiche übertragen werden kann und daher exemplarisch dargestellt werden (ELVERFELDT et al. 2008, 37). Lokale Ansätze sind detailliert und geländespezifisch, während regionale Ansätze generalisierte, qualitative oder statistisch gestützte Angaben ermöglichen. Trotz der Generalisierung sind regionale Ansätze auf Grund des besseren Überblicks von größerer Bedeutung. Bei Bedarf können detaillierte Untersuchungen kleinräumiger Gebiete durchgeführt werden (ELVERFELDT et al. 2008, 37).

Die heuristische Analyse beruht auf Experteneinschätzungen (ELVERFELDT et al. 2008, 36). Sie kann im regionalen (1:100.000 bis 1:500.000) und mittleren Maßstab (1:25.000 bis 1:50.000) verwendet werden. Nach einer detaillierten geomorphologischen Kartierung, die eine Vielzahl bedeutsamer Faktoren berücksichtigt, kann der Risikograd rasch bestimmt wer-

den. Jedoch ist der Arbeitsaufwand bis zu diesem Zeitpunkt erheblich, zudem werden ausschlaggebende Variablen subjektiv gewichtet (HUABIN et al. 2005, 557), weshalb die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse schwierig ist (ELVERFELDT et al. 2008, 36).

Die statistische Analyse beruht entweder auf einer bivariaten oder einer multivariaten statistischen Auswertung. Beide Betrachtungen sind im mittleren Maßstabsbereich anzuwenden, wobei die multivariate Analyse zudem im großen Maßstabsbereich (1:5.000 bis 1:15.000) eingeschränkt Verwendung findet (HUABIN et al. 2005, 557). Nach ELVERFELDT et al. (2008) finden statistische oder probabilistische Analysen und Modellberechnungen insbesondere auf großen Maßstäben Anwendung. Die Anfälligkeit wird durch die Überlagerung regional bedeutsamer Faktoren wie Geologie oder Vegetation berechnet. Statistische oder prozessbasierte Modelle dienen auf der lokalen Skala beziehungsweise auf großem Maßstab zur Untersuchung von einzelnen Ereignissen. Prozessmodelle können z.B. bei gravitativen Massenbewegungen die potentiellen Wirkungsbereiche als Start-, Transport- und Akkumulationsbereich modellieren (ELVERFELDT et al. 2008, 37). Prozessbasierte Modelle simulieren einen Vorgang und verfolgen numerische Ansätze, während Dispositionsmodelle per Parameterkombination auf die gefährdeten Bereiche über eine Extrapolation hinweisen. Das Auftreten vergangener Rutschungsereignisse kann detailliert herausgearbeitet werden. Ein weiterer Vorteil ist die Objektivität der Modelle. Allerdings ist es schwierig, die Daten vorzubereiten. Darüber hinaus werden keine ursächlichen Faktoren berücksichtigt und es handelt sich lediglich um eine Anfälligkeitsschätzung, die nicht auf benachbarte Areale übertragen werden kann (HUABIN et al. 2005, 557).

Bei der deterministischen Analyse handelt es sich um eine Ausfallwahrscheinlichkeitsanalyse, die im großen Maßstabsbereich Anwendung findet. Die Methode basiert auf der Annahme, dass bei gegebenen Bedingungen beziehungsweise einer bestimmten Ursache A eine definierte beziehungsweise deterministische Folge B eintritt (SPANGENBERGER 2008, 13). Der Datenbedarf für solche Modelle könne nach HUABIN et al. (2005) sehr kostspielig sein und häufig sei es unmöglich, die erforderlichen Daten zu bekommen, um die Modelle effizient einsetzen zu können (HUABIN et al. 2005, 557).

Hinzu kommt die Erstellung von Inventaren. Inventare basieren beispielsweise auf Kartierungen, Luftbildern, hochaufgelösten digitalen Höhenmodellen und/oder auf Satellitenbildern. Im Gegensatz zur Ansicht von HUABIN et al. (2005) seien qualitative Methoden wie die Erstellung von Inventaren oder heuristische Analysen nach ELVERFELDT et al. (2008) auf allen Maßstäben möglich (ELVERFELDT et al. 2008, 37).

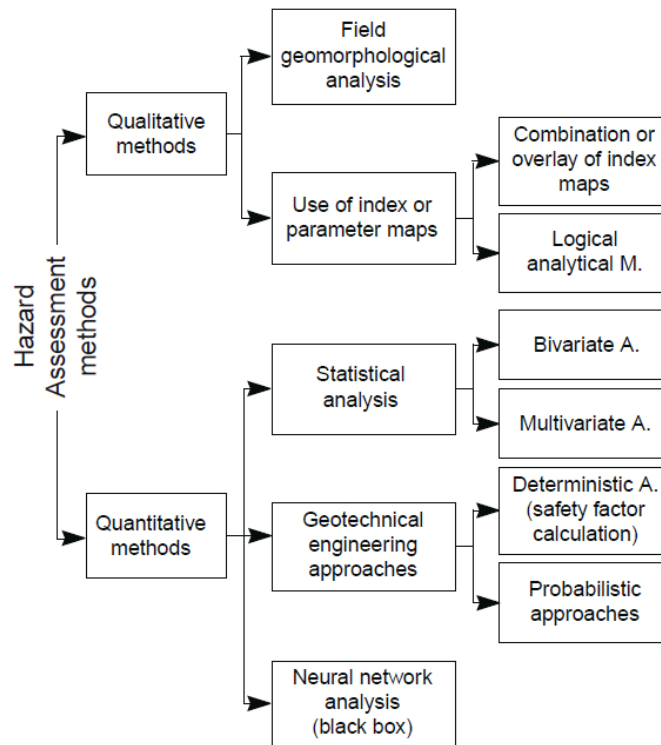


Abbildung 1: Klassifikation der Methoden für Rutschungen nach ALEOTTI & CHOWDHURY (1999). Quelle: ALEOTTI & CHOWDHURY 1999, 26.

CASCINI (2008) unterteilt die Methoden in einfache, mittlere und komplexe Modelle. Heuristische und empirische Modelle würden zu den einfachen, statistische Analysen zu den mittleren und deterministische zu den komplexen Methoden gehören. Je mehr Parameter berücksichtigt werden, desto komplizierter werden die Methoden (vgl. CASCINI 2008, 165f.; vgl. FELL et al. 2008, 92; vgl. AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY 2007, 19). Demnach sei die Wahl einer geeigneten Analyse von der Art der Massenbewegung, der Homogenität des Untersuchungsgebietes, der räumlichen Verteilung bedeutsamer Kausalfaktoren, der Fülle vorhandener Daten sowie des eigenen Sachverständes abhängig. Die Größe des dazugehörigen Maßstabs sollte sich an der Information orientieren, die je nach Ziel dargestellt werden soll, aber auch an der Qualität und Auflösung der Daten (CASCINI 2008, 166f.).

Die schwierigsten Aufgaben sind sowohl das Sammeln und die Auswahl von Daten als auch die Wahl des Maßstabs. Der Datenbestand muss konsistent sein, also denselben Referenzrahmen und dieselbe geographische Projektion aufweisen. Zudem müssen die Daten in thematischen Layern, die jeweils homogene Informationen beinhalten, angeordnet werden. Des Weiteren ist es wichtig, die Daten regelmäßig zu aktualisieren und sie auf Grund der Wechselseitigkeiten in gegenseitigen Bezug zu setzen, so dass Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Datensätze fortlaufend zunehmen (HUABIN et al. 2005, 556). Hinsichtlich aller me-

thodischer Verfahren betonen HUABIN et al. (2005) die Notwendigkeit der anschließenden Validierung. Modelle und Daten müssen auf ihre Genauigkeit und Zuverlässigkeit geprüft werden (HUABIN et al. 2005, 560).

CARRARA et al. (1999) betonen, dass jede Methode – egal ob sie deterministisch, stochastisch oder heuristisch fundiert ist – die realen Bedingungen nur stark vereinfacht darstellen kann (CARRARA et al. 1999, 127). Die einem Ereignis zugrunde liegenden Prozesse sind meist so komplex, dass deren Verhalten nicht vollständig vorhergesagt werden kann. Daher handelt es sich nach MERZ (2006) vielmehr um eine Risikoabschätzung als um eine Risikoberechnung. Auf solche Unzulänglichkeiten bei Risikoanalysen muss hingewiesen werden, da Unsicherheiten auf die Interpretation der Ergebnisse und auf weitere Entscheidungen erheblichen Einfluss ausüben. Optimale Entscheidungen sind nur unter Berücksichtigung aller bedeutsamen Unsicherheiten möglich (MERZ 2006, 49). Zudem ergeben unterschiedliche Verfahren nicht unbedingt dasselbe Ergebnis. Daher ist eine Kalibrierung der Wahrscheinlichkeiten mit Hilfe von beobachteten Daten wichtig (MERZ 2006, 35).

Die Abhängigkeiten zwischen Ereignissen sind häufig maßgebend für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses (common cause failure). Innerhalb kurzer Zeit können zwei oder mehrere Komponenten in einem System versagen. MERZ (2006) betont, dass die Bestimmung solcher Abhängigkeiten meist sehr umfassende Daten erfordert, die häufig nicht verfügbar sind. Daher werden Systemkomponenten oftmals als unabhängige Variablen betrachtet (MERZ 2006, 34).

Die Modelle ermöglichen zwar die Identifizierung potentiell gefährdeter Räume, geben jedoch keinerlei Aufschluss über Eintrittszeit, Magnitude und Größe eines Ereignisses (HUABIN et al. 2005, 550; CARRARA et al. 1999, 126).

### **3.1.3 Die Hazard-Map als Ergebnis der Gefahrenanalyse**

Eine Gefahreneinschätzung wird in der Regel als Karte dargestellt, die die räumliche Verteilung von Gefahrenzonen beinhaltet (HADMOKO et al. 2008, 2). Hazard-Maps geben Ort und Intensität eines individuellen Naturereignisses an, jedoch keinerlei Aufschluss über die regionale Vulnerabilität (GREIVING 2006, 79) oder den Zeitpunkt eines Ereignisses (HADMOKO et al. 2008, 2f.). Die Intensität eines Ereignisses wird anhand der Häufigkeit und Magnitude bestimmt. Da diese je nach Naturereignis, wie bereits erläutert, sehr unterschiedlich sind, muss die Intensität individuell klassifiziert werden. Gewöhnlich werden hierfür fünf relative Inten-

sitätsklassen verwendet (GREIVING 2006, 79; GREIVING et al. 2006, 13). Diese bilden anschließend durch Intervallwerte die Kategorien eines niedrigen, mittleren und hohen Naturgefahrenrisikos.

Naturereignisse werden meist einzeln betrachtet, können jedoch in engem Zusammenhang stehen. Rutschungen können durch Erdbeben ausgelöst werden, ebenso durch heftige Niederschläge. Hinzu kommen niederschlagsbedingte Hochwasser, die ihrerseits für Rutschungen ursächlich sein können. Rutschungen können in Einzelfällen auch zu Hochwassern führen, wenn Hangmassen in Stauseen niedergehen. Eine solche Katastrophe ereignete sich beispielsweise im Jahr 1963 in den italienischen Alpen, als ein Bergsturz in den Stausee von Vajont niederging und 1.900 Menschenleben forderte (ABELE 1994, 417).

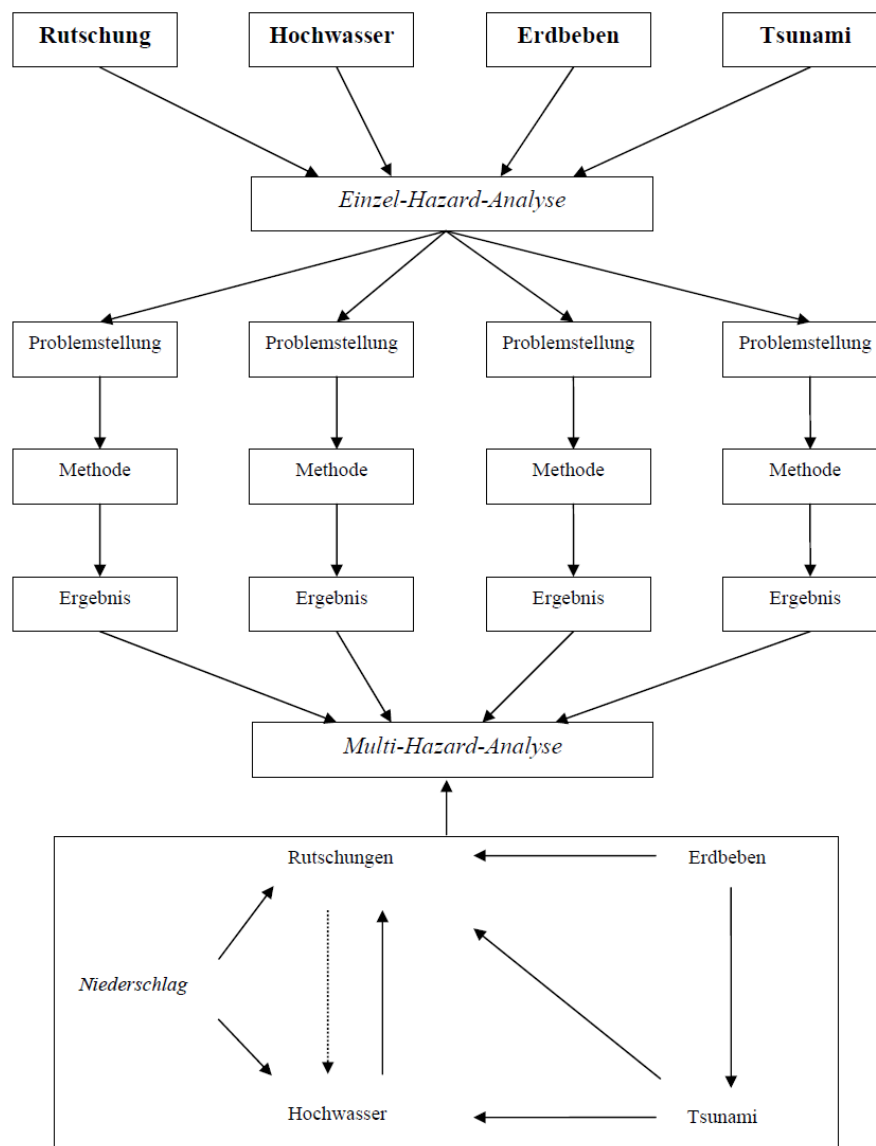


Abbildung 2: Die Beschreibung des methodischen Vorgehens sowie die Wechselwirkungen zwischen Rutschungen, Erdbeben, Tsunamis und Hochwasser. Quelle: Eigener Entwurf.

Seebeben erschüttern nicht nur den Erdboden, sondern lösen auch Tsunamis aus. Diese wiederum können ebenfalls zu Hangrutschungen führen. Die Wechselwirkungen sind unvorhersehbar und vielseitig – und methodisch daher entsprechend schwierig zu erfassen und zu modellieren.

Hazardanalysen sind ein wichtiger Schritt zur Prävention und zum Umgang mit Naturgefahren. Die Multi-Hazard-Analyse bildet einen neuen Ansatz im Bereich des Risikomanagements zur Erfassung komplexer Zusammenhänge von Naturereignissen (GREIVING 2006, 1).

### 3.2 Die Multi-Hazard-Analyse

Nach DI MAURO et al. (2006) beinhaltet die Perspektive der Multi-Hazard-Analyse drei Dimensionen: Zum Einen können in einem Gebiet unterschiedliche Naturereignisse auftreten, zum Anderen können sich diese Naturereignisse gegenseitig beeinflussen. Des Weiteren können auch zwei Naturereignisse durch differente Ursachen gleichzeitig auftreten, ohne dass eine Wechselseitigkeit besteht. Die Schwierigkeit liegt in den Intensitäten, Wiederholungsraten und Gefahrenpotentialen unterschiedlicher Naturereignisse. Davon abgesehen kann ein im Grunde kleines Naturereignis geringer Intensität einen Dominoeffekt auslösen, der Ereignisse mit noch größerer Intensität zur Folge hat (DI MAURO et al. 2006, 2f.).

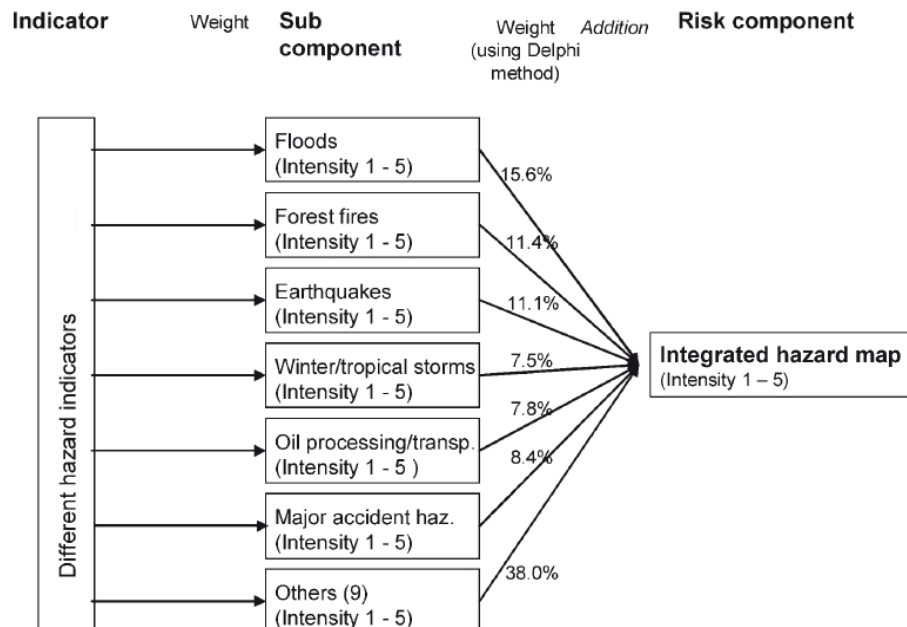


Abbildung 3: Ein beispielhafter Weg der Multi-Hazard-Analyse. Quelle: verändert nach GREIVING et al. (2006), 13.

Die Multi-Hazard-Analyse wird gewöhnlich in Form einer Aggregated Hazard Map erstellt. Hierbei werden die unterschiedlichen Intensitäten einzelner Hazard-Analysen zusammengerechnet. Allerdings ersetzen Multi-Hazard-Maps nicht die Einzel-Hazard-Maps (DI MAURO et al. 2006, 4). Mathematisch ist diese Methode einfach umzusetzen, wenn alle Intensitäten mit einer Stufe zwischen eins und fünf klassifiziert werden. Eins entspricht einer niedrigen Intensität, fünf einer hohen Intensität. Bei fünf betrachteten Naturgefahren liegen die addierten Werte demzufolge zwischen 5 und 25 (GREIVING 2006, 79). Darüber hinaus müssen die einzelnen Ergebnisse gewichtet werden, da sich folgende Frage stellt: Wie hoch ist das Gefahrenpotential eines Naturereignisses im Vergleich zu anderen Naturgefahren in derselben Region? Die Gewichtung kann auf historischen Daten basieren, z. B. Versicherungsschäden oder Anzahl an Ereignissen. Allerdings besteht hier die Gefahr von mangelhaften oder unzureichenden Daten. Darüber hinaus erfassen monetäre Werte häufig nicht das gesamte Schadensausmaß (OLFERT et al. 2006, 128ff.). Die Gewichtung erfordert normative Entscheidungen, die sich erheblich auf das Endergebnis auswirken, und wird gewöhnlich mit der Delphi-Methode durchgeführt (GREIVING 2006, 79).

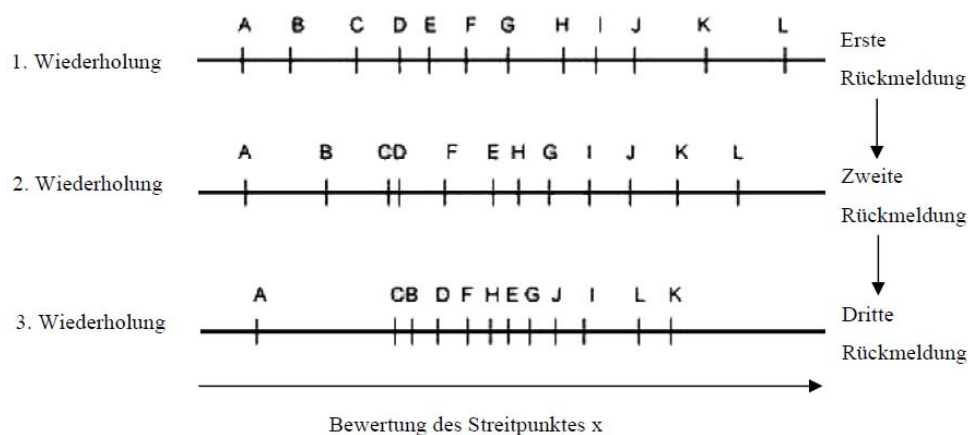


Abbildung 4: Idealisierter Prozess der Kalibrierung von Experteneinschätzungen (A bis L) durch die Delphi-Methode. Quelle: verändert nach OLFERT et al. 2006, 129.

Die Delphi-Methode ist eine etablierte Methode zur Gewichtung der regionalen, unterschiedlichen Risiken eines Naturereignisses (OLFERT et al. 2006, 128). Mit Hilfe eines statistischen Verfahrens werden künftige Ereignisse eingeschätzt. Fachexperten haben in mehreren Runden die Möglichkeit, bestimmte Thesen einzuschätzen. Ab der zweiten Runde werden anonyme Rückmeldungen ermöglicht, wie andere Experten geantwortet haben. Auf diese Weise wird versucht, dem Einfluss einer Person oder weniger dominanter Personen entgegenzuwirken. Der Verlauf über mehrere Runden ermöglicht den Teilnehmern, ihre vorangegan-

genen Ansichten zu überdenken und anzupassen. Nach einigen Runden können die verschiedenen Ansichten kollektiv ausgewertet werden. Ziel ist es, einen Konsens (z. B. durch den Median aller Antworten) zwischen den Meinungen zu erhalten, um eine Gewichtung vornehmen zu können. In diesem Falle wird der Intensitätsgrad einer bestimmten Naturgefahr mit der Delphi-Gewichtung multipliziert. Der Multiplikator kann jederzeit variiert werden, um sich einem plausiblen Ergebnis anzunähern (GREIVING 2006, 79ff.; OLFERT et al. 2006, 128; ELMER et al. 2010, 115).

GREIVING (2006) betont den Nachteil dieser Methode: Die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Naturereignissen werden nicht erfasst (GREIVING 2006, 81). Dies ist eine erhebliche Schwäche, denn Naturereignisse weisen nichtlineare Zusammenhänge auf. GREIVING (2006) zufolge hat sich in diesem Problemfeld bisher wenig getan (GREIVING 2006, 81).

Hinzu kommen weitere Gewichtungsprobleme. Die Delphi-Methode gilt als „Momentaufnahme“. Ereignisse wie der Tsunami im Dezember 2004 würden die Gewichtung auf Grund eines schwerwiegenden Ereignisses erheblich verzerren, obwohl die generelle Intensität der Tsunamis als niedrig klassifiziert wird. Daher müssen die Werte regelmäßig aktualisiert werden. Darüber hinaus sei die Datenverfügbarkeit – z. B. über vergangene Ereignisse – der einzelnen Naturgefahren unterschiedlich, was die Vergleichbarkeit und damit eine signifikante Gewichtung einschränkt (GREIVING 2006, 81). Demzufolge sei nach DI MAURO et al. (2006) diese Form der Multi-Hazard-Analyse unzureichend. Es reiche nicht aus, die Ergebnisse einzelner Analysen aufzuaddieren.

Im anschließenden Kapitel wird das Untersuchungsgebiet Cilacap beschrieben. Neben der naturräumlichen Gliederung werden die potentiellen Naturgefahren, von denen Cilacap bedroht ist, erläutert.



## 4 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Im Folgenden werden die Verortung des Untersuchungsgebietes sowie relevante, physisch-geographische Grundlagen erläutert. Im Anschluss werden die potentiellen Naturgefahren beschrieben, von denen Cilacap in regelmäßigen Zeiträumen betroffen ist.

### 4.1 Naturräumliche Gliederung

Java erstreckt sich im Indischen Ozean von etwa 6° südlicher Breite und 105° östlicher Länge bis circa 9° südlicher Breite und 115° östlicher Länge über eine Fläche von 132.107 km². Cilacap bezeichnet sowohl die Regentschaft als auch die Stadt an der südlichen Küste Javas. Sie gehört zur Provinz Zentraljavas (*Java Tengah*).

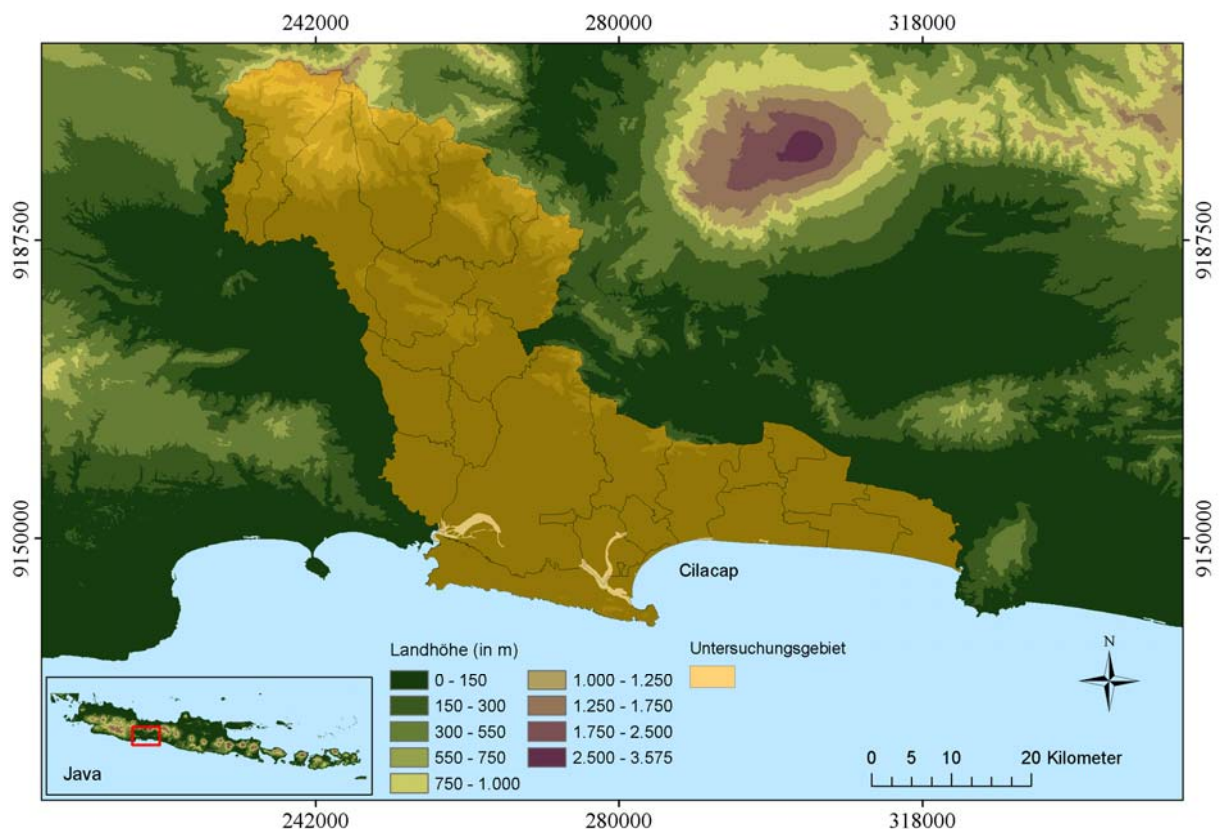


Abbildung 5: Das Untersuchungsgebiet Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Indonesien liegt an einer der tektonisch aktivsten Zonen der Erde, dem zirkumpazifischen Feuergürtel (ALCÁNTARA-AYALA 2002, 113). Dort treffen die eurasische, die indisch-

australische, die pazifische sowie die philippinische Platte aufeinander (BRUNE et al. 2010, 590). Die Insel Java befindet sich an der südlichen Grenze der eurasischen Platte. Die indisch-australische Platte bewegt sich relativ zu Südostasien nach Norden (MARFAI et al. 2008, 336) beziehungsweise Nordosten (VORLAUFER 2009, 17) und wird entlang des Sundagrabens subduziert. Daraus resultieren eine Vielzahl von Vulkanen, magmatischen und tektonischen Erdbeben und Tsunamis. Des Weiteren führen Landabsenkungen und heftige Niederschläge während der Regenzeit zu Überflutungen. Hangrutschungen ergeben sich aus der Kombination von geologischer Instabilität, starker Hangneigung und Starkregenereignissen. Ebenso sind Erdbeben, Wasserstandsänderungen, Sturmfluten und Erosion für Rutschungen verantwortlich. Jedes Jahr gehören Flussüberschwemmungen zu den häufigsten Naturereignissen (MARFAI et al. 2008, 335f.; HUABIN et al. 2005, 548).

Das Klima Javas sei im Westen nach der Klimaklassifikation von Troll und Pfaffen ein immerfeuchtes tropisches Regenklima (VORLAUFER 2009, 27). Dies lässt sich jedoch nicht mit der Regen- und Trockenzeit vereinbaren, die in diverser Literatur beschrieben und auch anhand der Klimadaten der Region Cilacap (Daten: LIPI) erkennbar ist. Die jahreszeitlich wechselnden Monsune – bedingt durch die jahreszeitliche Verlagerung der ITC – bestimmen das Klima Javas. Entsprechend der geographischen Lage von 6° südlicher Breite unterliegt die Region einer winterlichen (Südwinter/Nordsommer) Trockenzeit zwischen Mai und Oktober und sommerlichen (Südsommer/Nordwinter) Regenzeit zwischen November und April (s. Abbildung 6) (HADMOKO et al. 2010, 5; VORLAUFER 2009, 29). Zentraljava steht im Nordsommer unter dem Einfluss des SO-Passats (s. Abbildung 6). Da dieser, aus dem trockenen Australien kommend, sehr wenig Feuchtigkeit aufnehmen kann, sind sehr geringe Niederschläge die Folge. Trockenzeiten über einige Monate sind typisch. Bedeutend sind die Luv- und Lee-Effekte der Gebirge, die sich auf die Niederschläge und damit auch auf die Vegetation auswirken. Hinzu kommt der Einfluss des El-Niño-Phänomens (VORLAUFER 2009, 29f.), insbesondere in Bezug auf die Variabilität der Dürreperioden (vgl. D'ARRIGO & SMERDON 2008, 1ff.). An dieser Stelle kann nicht näher auf dieses Phänomen eingegangen werden. Zudem werden Dürrekatastrophen in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Nach RUNTUNUWU & PAWITAN (2008) würden die Dürreperioden durch die globale Erwärmung länger und die Regenzeiten kürzer werden. Zugleich würden sich allerdings die Intensitäten erhöhen, was Naturereignisse wie Hochwasser und Rutschungen begünstigen würde (RUNTUNUWU & PAWITAN 2008, 55).

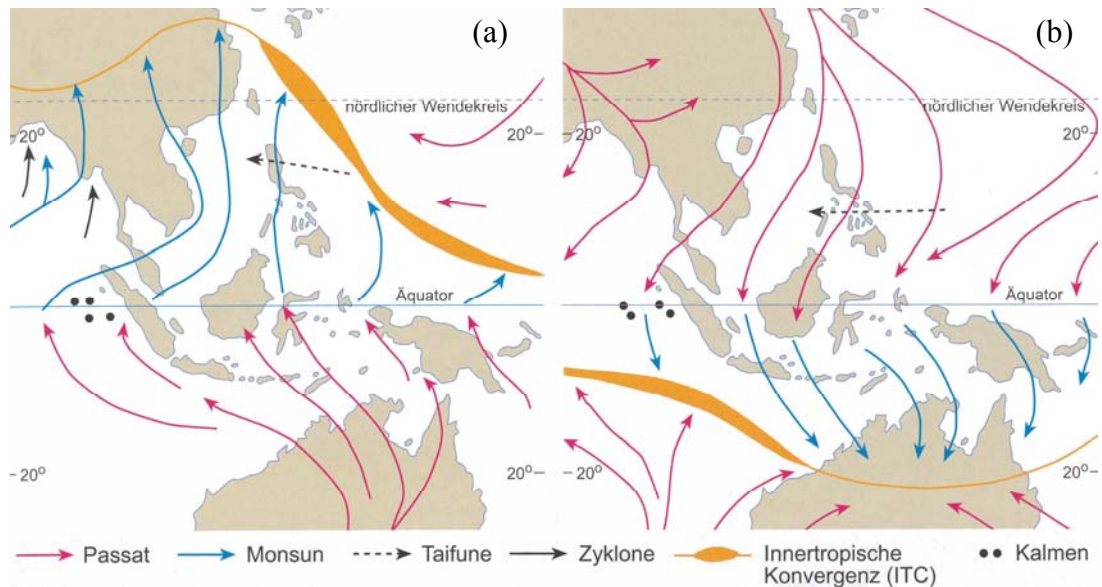


Abbildung 6: Die atmosphärische Zirkulation über Südostasien im Nordsommer/Südwinter (a) und im Nordwinter/Südsommer (b). Quelle: VORLAUFER 2009, 29.

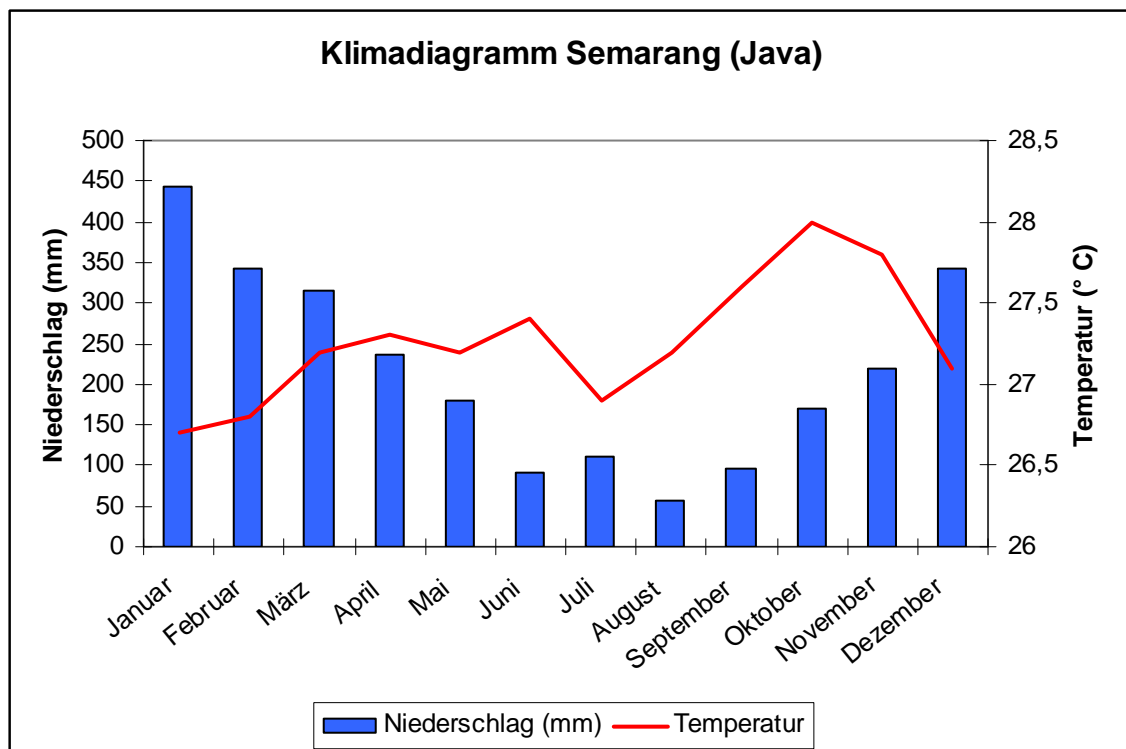


Abbildung 7: Klimadiagramm Semarang (Java), 3 m ü. NN., Niederschlagssumme 2603 mm, Jahresdurchschnittstemperatur 27,23 °C. Daten: [www.klimadiagramme.de](http://www.klimadiagramme.de). Quelle: Eigene Darstellung.

## 4.2 Die potentiellen Naturgefahren in Cilacap

Indonesien liegt im Einflussbereich von vier Plattengrenzen, woraus verschiedenste komplexe Naturereignisse resultieren – beispielsweise Erdbeben, Tsunamis und Vulkanausbrüche. Umgeben vom Indischen und Pazifischen Ozean führen, abgesehen von den jahreszeitlich bedingten Regen- und Trockenperioden, klimatologische Ereignisse wie El Niño und La Niña zu extremen Dürreperioden, Hochwassern, Waldbränden und Rutschungen (BRUNE et al. 2010, 590; SUBAGIO & AMHAR 2009, 1). Cilacap wird von einer Vielzahl an Naturereignissen bedroht. Die Abbildung 8 zeigt die Anzahl der Ereignisse in den Provinzen Indonesiens zwischen 1815 und 2009. Ersichtlich ist die hohe Anfälligkeit Zentraljavas (*Java Tengah*), in der auch Cilacap gelegen ist. Die restlichen 28 Provinzen weisen überwiegend Zahlen unter 300 Ereignissen auf.

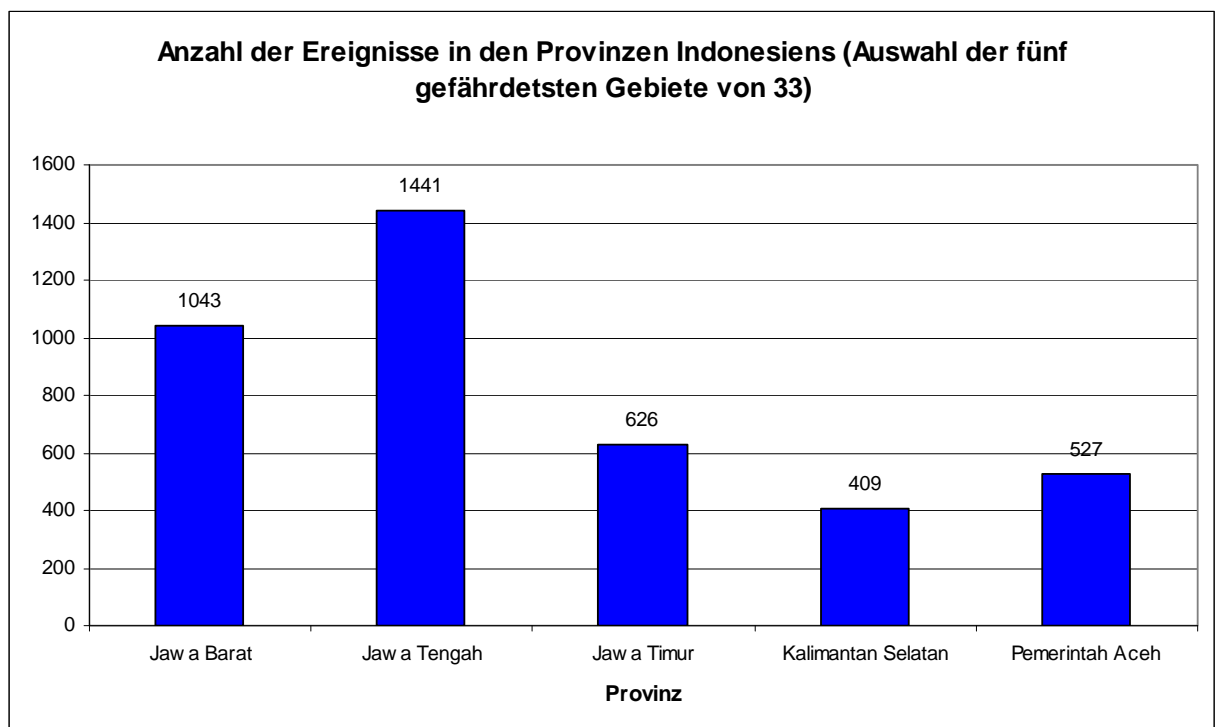


Abbildung 8: Die Anzahl der Naturereignisse in Indonesien zwischen 1815 und 2009. Quelle: DIBI.

In dieser Arbeit werden gravitative Massenbewegungen, Hochwasser, Erdbeben und Tsunamis betrachtet und grundlegend erläutert. Verschiedene Zahlen und Fakten zu Indonesien verdeutlichen die regelmäßige Gefahr durch diese Naturereignisse.

#### 4.2.1 Gravitative Massenbewegungen

Gravitative Massenbewegungen „*sind hangabwärts gerichtete, der Schwerkraft folgende Verlagerungen von Fels, Schutt und Feinsubstrat. Die Verlagerungsprozesse beinhalten das Kippen, Fallen, Rutschen, Fließen und die kombinierte, komplexe Bewegung*“ (GLADE & STÖTTER 2008, 151). Bei solchen Rutschungen sind Volumina zwischen Kubikmetern und Kubikkilometern möglich. Die Geschwindigkeit ist unabhängig von dem bewegten Volumen und liegt zwischen wenigen Millimetern pro Jahr bis zu mehreren Metern pro Sekunde. Auslöser können sowohl anthropogene als auch natürlich bedingte Erschütterungen sein, aber auch Starkregenereignisse sowie lang anhaltende Niederschläge. Schwierig wird die Ursachenfindung, wenn das Bodenporenwasser durch beispielsweise eine Schneeschmelze aufgefüllt ist, die Pufferkapazität allerdings noch ausreicht und erst durch ein darauffolgendes Niederschlagsereignis überschritten wird. In diesem Fall erschwert die Komplexität der internen und externen Systemfaktoren eine Differenzierung zwischen Ursache, Wirkung und Auslöser (GLADE & STÖTTER 2008, 152f.). Die Schadenswirkung ist von der jeweiligen Intensität abhängig, allerdings ist die Intensitätseinteilung für jede Massenbewegung vielfältig (vgl. GLADE & STÖTTER 2008, 157). Dieser internen Komplexität kann diese Arbeit nicht gerecht werden, weshalb diverse Typen gravitativer Massenbewegungen in der anstehenden Analyse nicht weiter differenziert werden.

Das durch den Monsun geprägte Klima Javas weist eine Trocken- und Feuchtperiode auf. In der Feuchtperiode zwischen Dezember und März fallen hohe Niederschlagssummen, die meist ursächlich, d. h. der Auslöser für gravitative Massenbewegungen sind. Jedes Jahr lösen starke Niederschläge zahlreiche Rutschungsereignisse aus. Zwischen 1990 und 2005 starben auf Java 1.112 Menschen. Die hohen Opferzahlen sind nicht zuletzt auf das Bevölkerungswachstum zurückzuführen, da zunehmend auch instabile Hanglagen besiedelt werden. Hinzu kommen Rodung und intensive Nutzung der Hänge, was die Stabilität verringert und somit die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Rutschung erhöht (MARFAI et al. 2008, 342; HADMOKO et al. 2008, 2). Für Cilacap liegt leider keine Dokumentation historischer Rutschungsereignisse vor. Solche Daten könnten mit Niederschlagsaufzeichnungen verglichen werden, um eine Beziehung zwischen Massenbewegung und Niederschlagsereignissen darzustellen.

#### 4.2.2 Hochwasser

Die Regenzeit bringt insbesondere im Zeitraum Dezember bis März hohe Niederschläge. Wird die Wasseraufnahmekapazität des Bodens überschritten, kommt es zu Hochwasser und Überflutungen. Die Menschen in den Niederungen sind im Besonderen davon betroffen. Der Landnutzungswandel verstärkt das Auftreten von Überschwemmungen: Geschlossene Wälder weichen intensivem Ackerbau und versiegelter Fläche, Gebirge und Anhöhen werden gerodet, was zu erhöhtem Oberflächenabfluss führt. Die Prozesse des Abflusses sind komplex und können an dieser Stelle nicht erläutert werden. Eine detaillierte Beschreibung der hydrologischen Prozesse geben BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996). Einzelne Komponenten werden gegebenenfalls bei der Hochwasseranalyse beschrieben.

WISNER et al. (2006) differenzieren Hochwasser in Sturzfluten, flussartig langsam einsetzende Hochwasser, niederschlagsinduzierte Hochwasser, Hochwasser bedingt durch tropische Zyklone sowie Hochwasser, die durch Tsunamis verursacht werden (WISNER et al. 2006, 217).

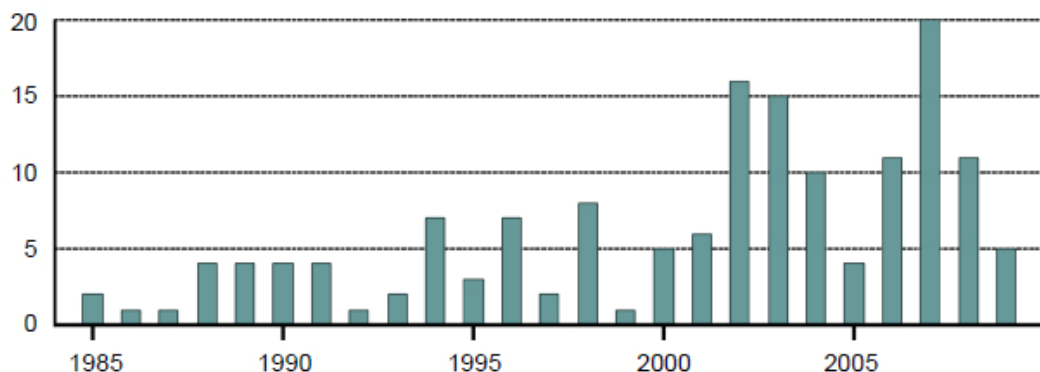


Abbildung 9: Anzahl der Hochwasserereignisse pro Jahr in Indonesien. Quelle: Hidayat 2009, 1.

Die Abbildung 9 gibt einen Überblick über die Häufigkeit von Hochwasserereignissen in Indonesien. Zudem stünde Indonesien nach RUNTUNUWU & PAWITAN (2008) hinsichtlich der Hochwasserereignisse in Asien an dritter Stelle (RUNTUNUWU & PAWITAN 2008, 55). Cilacap gehört unter anderen zu den am stärksten von Überschwemmungen gefährdeten Regentchaften Zentraljavas (MARFAI et al. 2008, 338). Zwischen 2003 und 2005 kommt es in Zentraljava zu 91 Ereignissen, bei denen 1.337 Menschen sterben und 262 vermisst werden, 211.156 Häuser werden zerstört, eine Straßenlänge von 635 Metern sowie 16 Brücken werden beschädigt, 6.927 Hektar Ackerflächen und 1.230 Hektar Fischteiche sind von den Fluten betroffen (MARFAI et al. 2008, 340).

### 4.2.3 Erdbeben

Die Erdbeben Indonesiens resultieren aus dem Zusammenstoß der indisch-australischen mit der eurasischen Platte (VORLAUFER 2009, 23; MARDIATNO et al. 2008, 1). Erdbeben entstehen durch die plötzliche Freisetzung mechanischer Energie in der Erdkruste. Der Aufbau der Scherspannung verläuft sehr langsam und lässt daher keine Vorhersage zu. Übersteigen die Spannungen die Scher- beziehungsweise Gesteinsfestigkeit, kommt es zur Entladung der aufgestauten Energie und zu ruckartigen Bewegungen der Erdkruste. Dabei bestimmen die Größe der Bruchfläche, die Verschiebung der benachbarten Blöcke entlang der Bruchfläche und die Gesteinsfestigkeit die Stärke eines Erdbebens. Erdbebenwellen werden in Oberflächen- und Raumwellen unterteilt. Die longitudinalen und transversalen Raumwellen bewegen sich durch den Erdball, während sich die Oberflächenwellen entlang der Erdoberfläche ausbreiten und dort zu Bodenbewegungen führen, die schadensbestimmend sind (SCHMINCKE & HINZEN 2008, 146).

Den bisher angesprochenen primären Gefahren können sekundäre folgen. Hierzu zählen z. B. Bodenverflüssigung, Hangrutschungen, Flutwellen oder Brände (SCHMINCKE & HINZEN 2008, 147). Hier werden erneut die Wechselwirkungen unterschiedlicher Naturereignisse deutlich.

Das U.S. Geological Survey (USGS) dokumentiert für Indonesien allein seit dem Jahr 2000 49 Erdbeben, wobei das schwächste Beben eine Magnitude von 6,3 auf der Richterskala aufweist (USGS). Nach HAMZAH et al. (2000) werden in Indonesien jedes Jahr rund 460 Erdbeben mit einer Magnitude über 4,0 gemessen. Zwischen 1600 und 1998 seien allein im Bereich des Ost-Java-Bogens, in dem auch Cilacap gelegen ist, 82 schwere Erdbeben dokumentiert – das entspräche 45 Prozent der Gesamtanzahl an Erdbeben in Indonesien (HAMZAH et al. 2000, 27, 32). Ein schweres Erdbeben ereignete sich am 30. September 2009 auf Sumatra und forderte 1.200 Menschenleben. Zudem war die Infrastruktur mit über 135.000 beschädigten oder zerstörten Gebäuden stark betroffen. Trotz geringer Versicherungsdichte beliefen sich die Versicherungsschäden in Padang auf 100 Millionen US\$ und einen Gesamtschaden von etwa 2,2 Milliarden US\$ - das teuerste Beben der letzten Jahre. Die Hälfte der Menschen wurde von Hangrutschungen und Schlammlawinen begraben (SPRANGER 2009, 22f.). Obwohl Padang nicht zum Untersuchungsgebiet in dieser Arbeit zählt, verdeutlicht es die Wechselwirkungen und Folgen eines Naturereignisses. Davon abgesehen sind solche Ereignisse auch in der Region von Cilacap möglich. Nicht zuletzt führen Seebeben zu einer weiteren Bedro-

hung, den Tsunamis. Seit dem Jahr 2000 wurde Indonesien laut der NOAA von fünf Tsunamis getroffen (NOAA).

#### **4.2.4 Tsunamis**

Tsunamis sind Gravitationswellen, die einerseits durch vertikale Bodenbewegungen im Herdgebiet eines Erdbebens, andererseits durch Massenbewegungen als Folge von Vulkaneruptionen und Rutschungen an der Küste oder am Meeresboden verursacht werden (SCHMINCKE & HINZEN 2008, 147). Massenbewegungen können allerdings auch ohne Erschütterung durch Überschreiten kritischer Hangneigungen ausgelöst werden. Hinzu kommen untermeerische Vulkanausbrüche, Kollapse von Vulkangebäuden oder Calderabildung im Ozean (SCHEFFERS 2008, 173). Die Wellenbewegung betrifft die gesamte Wassersäule bis zum Meeresboden. Ein Tsunami kann im tiefen Ozean in Abhängigkeit der Wassertiefe Geschwindigkeiten von mehreren hundert Stundenkilometern erreichen – bei 4.000 Metern Tiefe bereits 713 Stundenkilometer und mehr. Im Küstenbereich nimmt die Geschwindigkeit ab, während die Wellenamplitude zunimmt. Dies resultiert aus dem Abbremsen im Schelf, während von hinten enorme Wassermassen nachgeschoben werden, so dass es zu einem Aufbäumen des Tsunamis, dem „*run up*“, kommt. Dieser kann neben den gewöhnlichen zehn bis 20 Metern auch 50 oder 100 Meter über dem Meeresspiegel liegen. In Küstennähe kann sich die Welle – beziehungsweise eine Abfolge von Tsunamis – mehrere Kilometer landeinwärts bewegen und zu Überschwemmungen führen. Von der eigentlichen Welle abgesehen, birgt das mitgeführte Material die Gefahr erschlagen zu werden, hinzu kommt der Sog des zurückfließenden Wassers (SCHMINCKE & HINZEN 2008, 147; SCHEFFERS 2008, 174).

Tsunamis sind sowohl in geologischen Zeiträumen als auch nach Menschenjahren relativ häufig und treten im Abstand weniger Jahre auf (SCHEFFERS 2008, 174). Indonesien liegt im Kollisionsbereich dreier tektonischer Platten im Pazifischen Ozean und ist demzufolge stark anfällig für Erdbeben und Tsunamis. Nach BRYANT (2008) gab es in den letzten 2.000 Jahren allein im Pazifischen Ozean 1.491 Tsunamis, davon 184 in Indonesien. Das entspricht 12,3 Prozent aller Ereignisse. Im selben Zeitraum starben im Pazifischen Ozean 692.464 Menschen durch Tsunamis (BRYANT 2008, 18, 20). Nach HAMZAH et al. (2000) sind für den Zeitraum zwischen 1600 und 1998 105 Tsunamis dokumentiert, von denen 95 durch Erdbeben verursacht wurden (HAMZAH et al. 2000, 27). Das drittstärkste Erdbeben des 20. Jahrhunderts mit einer Magnitude von 9,1 auf der Richterskala (USGS) (nach HARJADI (2008) & BRUNE et al.



(2010) 9,3) löst am 26. Dezember 2004 den verheerenden Tsunami aus, der allein in Indonesien knapp 170.000 Menschen das Leben kostet. Am 17. Juli 2006 trifft erneut ein Tsunami die südliche Küste Javas und fordert über 730 Todesopfer (nach MARDIATNO et al. (2008) 600 Tote). Allein in Cilacap sterben 142 Menschen, 57 werden vermisst und sieben verletzt (MARFAI et al. 2008, 340f.; HARJADI 2008, 2; BRUNE et al. 2010, 590; MARDIATNO et al. 2008, 1). Nach SCHEFFERS (2008) werden die durch Tsunamis bedingten Opferzahlen nur von denen der Erdbeben, Überschwemmungen und Vulkanausbrüche übertroffen (SCHEFFERS 2008, 174).

## 5 Daten und Vorverarbeitung

Für die nachfolgenden Analysen werden unterschiedliche Datensätze verwendet. Sie werden sowohl vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) als auch vom Indonesischen Institut für Wissenschaft (LIPI) zur Verfügung gestellt. Um Homogenität der Daten gewährleisten zu können, müssen einzelne Datensätze auf Fehler überprüft und nachbearbeitet werden. Die vorhandenen Raster- und Vektordatensätze des DLR sind vollständig dokumentiert und mit großer Genauigkeit erstellt worden, weshalb diese als Referenz genommen und die indonesischen Daten darauf angepasst werden. Alle Daten werden mit dem geographischen Koordinatensystem *WGS 1984 UTM Zone 49 S* projiziert. Die indonesischen Daten wurden teilweise im MapInfo-Format bereitgestellt, die mit dem *FME Universal Translator* in ESRI-Shapefiles transformiert werden, um sie anschließend in ArcGIS (ArcMap, Version ArcView 9.3.1) importieren und weiter verarbeiten zu können.

Die *Hangneigung* wird mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells (DHM/DEM) beziehungsweise digitalen Geländemodells (DTM) berechnet. Dieses basiert auf einer Kombination eines ASTER- und SRTM-Datensatzes – mit einer Auflösung von 30 Meter –, die vom DLR zur Verfügung gestellt werden. Die ASTER-Daten verfügen über eine Auflösung von 30 Meter, allerdings sind einige Pixel im Untersuchungsgebiet vorhanden, die keine Werte und damit Datenlücken aufweisen.

Der SRTM-Datensatz wurde am 5. Februar 2007 – basierend auf einer Verbindung von SRTM-X- und SRTM-C-Band-Daten – für Java/Bali prozessiert und vom DLR zur Verfügung gestellt. Eine Bildoptimierung wurde bereits durchgeführt. Dem Bereich des Ozeans wurde ein negativer Pixelwert von -9.999 zugeordnet. Mit Hilfe des Tools *Raster Calculator* in ArcGIS wurde dieser Wert auf Null gesetzt. Der Bereich des Ozeans wurde aus dem ASTER-Datensatz bereits entfernt.

Das X-Band der SRTM-Daten verfügt im Gegensatz zum C-Band und zum ASTER-Datensatz lediglich über eine Auflösung von 90 Metern, wodurch die Auflösung der SRTM-Daten beeinträchtigt wird. Deshalb werden die ASTER- den SRTM-Daten vorgezogen. Die Datenlücken werden mit Hilfe des *Raster Calculator* mit den Werten des SRTM-Datensatzes gefüllt. Der aus der geringeren Auflösung von 90 Metern resultierende Fehler ist minimal und kann vernachlässigt werden. Hinzu kommt das Problem von Artefakten – signifikant stark schwankenden Höhenwerten beziehungsweise Anomalien zwischen benachbarten Pixeln –, die sich insbesondere im Bereich der Siedlungen finden. Solche Artefakte können die Ergeb-

nisse verfälschen und werden daher mit dem *Low-Pass Filter* in ArcGIS reduziert. Die Hangneigung wird mit ArcGIS aus dem DHM abgeleitet und in Prozent dargestellt.

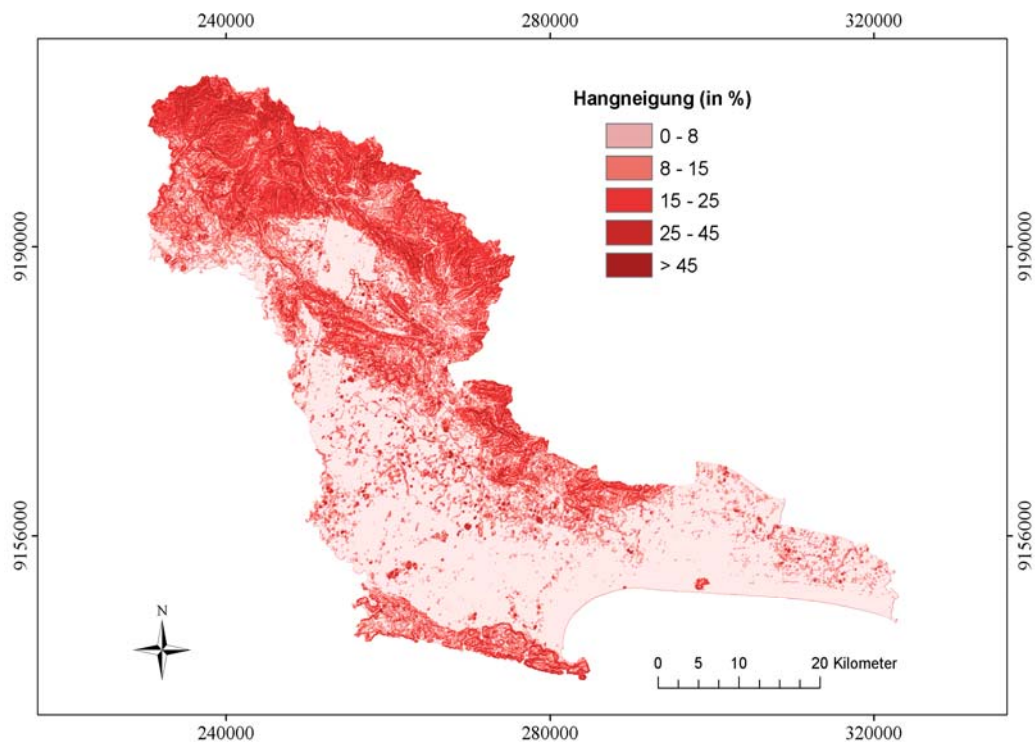


Abbildung 10: Hangneigungskarte von Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Daten zur *Landnutzung* werden vom DLR bereitgestellt. Sie benötigen keiner weiteren Untersuchung auf Vollständigkeit und Qualität. Es handelt sich um ein Shapefile (Polygon), das am 11. Juli 2008 erstellt wurde. Die Informationen wurden aus unterschiedlichen Geodaten zusammengestellt und stammen sowohl aus Daten vom *National Institute of Aeronautics and Space* (LAPAN, Indonesien) als auch aus Daten der *National Coordination Agency for Surveys and Mapping* (BAKOSURTANAL, Indonesien) aus den Jahren 2003 beziehungsweise 2006. Der Quellmaßstab liegt bei 1:100.000. Die Auflösung liegt bei 25 Metern, die Positionsgenauigkeit der Attribute bei 50 Metern.

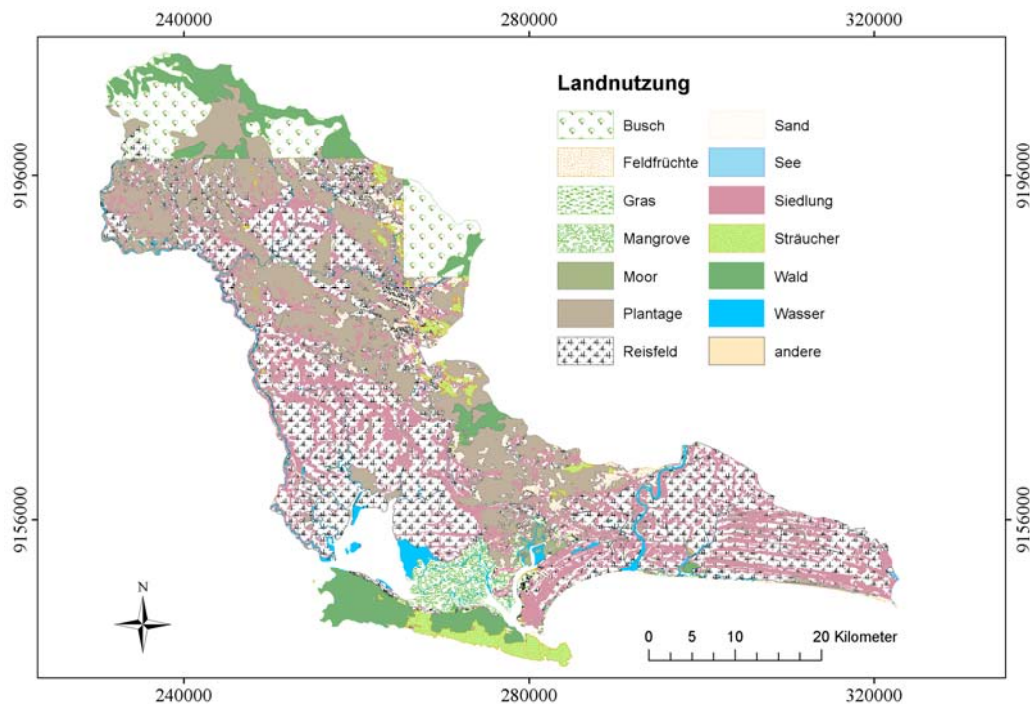


Abbildung 11: Die Landnutzung in Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Daten zur *Pedologie* stammen vom LIPI. Es sind keine Metadaten vorhanden, die auf den Ursprung und die Aktualität der Daten schließen lassen würden. Der ursprüngliche Maßstab ist unbekannt, weshalb keine Angabe über die Genauigkeit möglich ist. Es handelt sich um ein Shapefile (Polygon). Die Einteilung der Böden entspricht unterschiedlichen Klassifikationen, auf die in Kapitel 6.1.2 genauer eingegangen wird. Die Beschreibung der gewählten Bodentypen ist sehr schlicht und gibt keinerlei Aufschluss über charakteristische Eigenschaften. Zudem werden die genannten Böden in jeder offiziellen Bodenklassifikation (z.B. USDA oder FAO) weiter differenziert. Eine solche Differenzierung ist anhand der vorliegenden Daten nicht möglich, was deren Interpretation erheblich erschwert. Dies kann sich letztendlich auf die Analyseergebnisse auswirken.

Die Daten zur *Geologie* und *Tektonik* stammen ebenfalls vom LIPI. Auch hierfür sind keine weiteren Metadaten verfügbar.

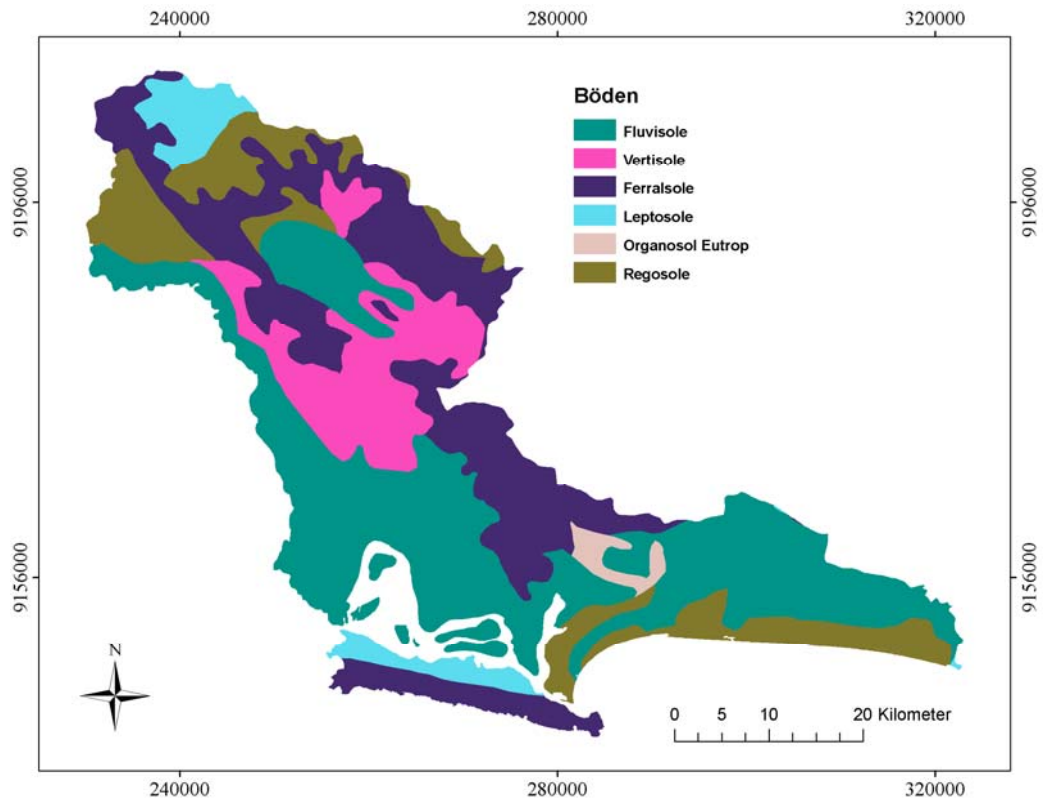


Abbildung 12: Die Böden in Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

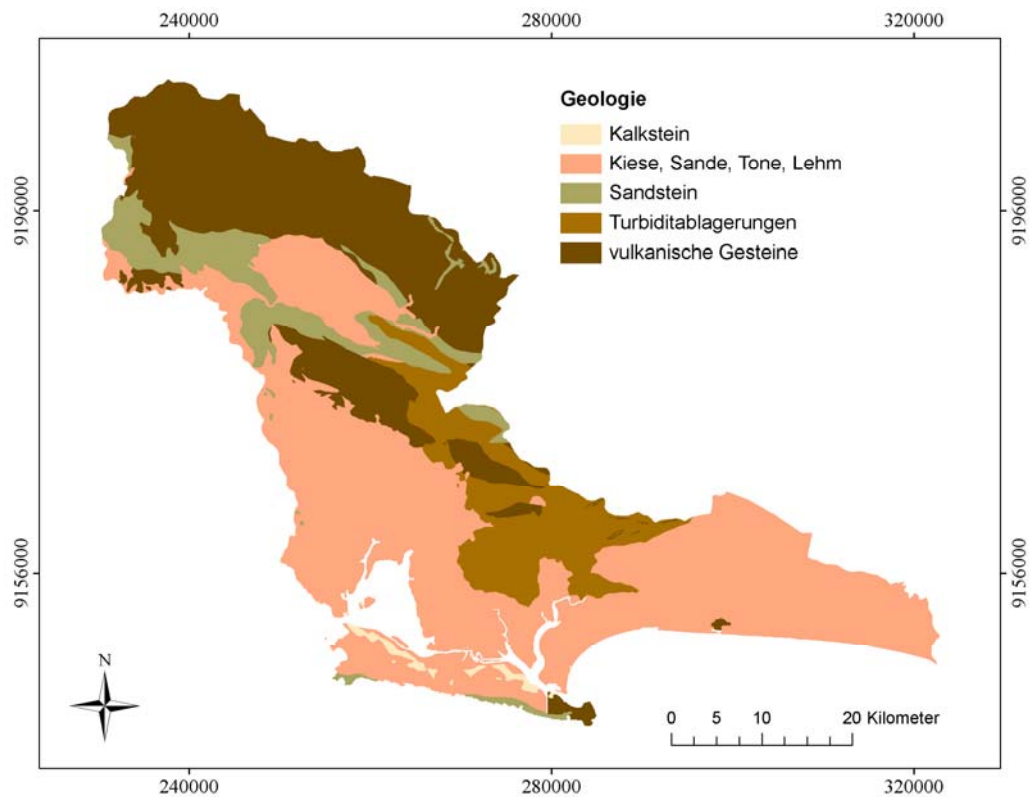


Abbildung 13: Die Geologie in Cilacap. Die geologischen Einheiten wurden in der Darstellung stark generalisiert. Die Tabelle 4 enthält detaillierte Informationen zur Geologie. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

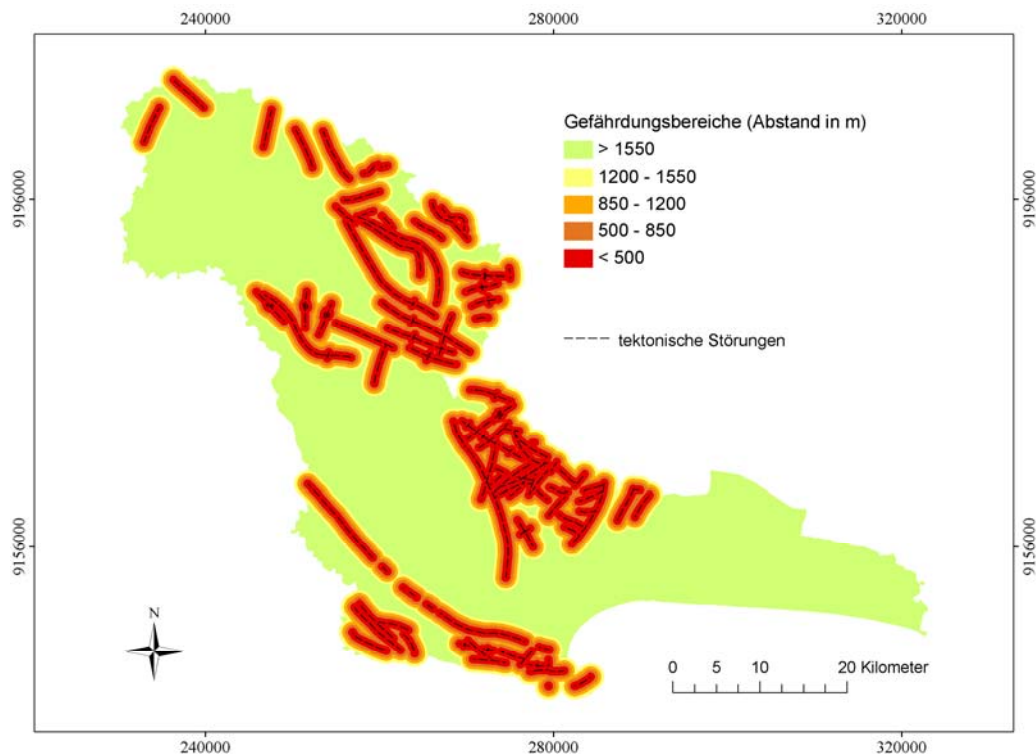


Abbildung 14: Störungslinien in Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Problematisch ist, dass sowohl die Böden als auch die Geologie nicht anhand des vorliegenden DHM digitalisiert wurden und die Polygone trotz gleicher Projektion eine geometrische Verschiebung aufweisen (zur Orientierung wurde die Küstenlinie herangezogen). Teilweise ist ein Fehler von über 400 Metern zu messen, der hinsichtlich der Auflösung des DHM von 30 Metern korrigiert wird. Auf Grund der Tatsache, dass die Böden sehr generalisiert digitalisiert wurden, werden die abweichenden Polygone dem DHM angepasst. Um Homogenität zwischen den Shapefiles und dem zu Grunde liegenden Raster zu erhalten, wurde ein vorliegendes Shapefile der Küstenlinie herangezogen, das vom DLR zur Verfügung gestellt und – basierend auf dem Raster des DHM – digitalisiert wurde. Die Korrektur des Boden-Shapefiles wird mit Hilfe des *Editors* und des darin beinhalteten *Snapping* Tools in ArcGIS durchgeführt. Bei den geologischen Daten liegen ähnliche Digitalisierungsfehler wie bei der Pedologie vor. Sie werden auf die gleiche Art und Weise korrigiert.

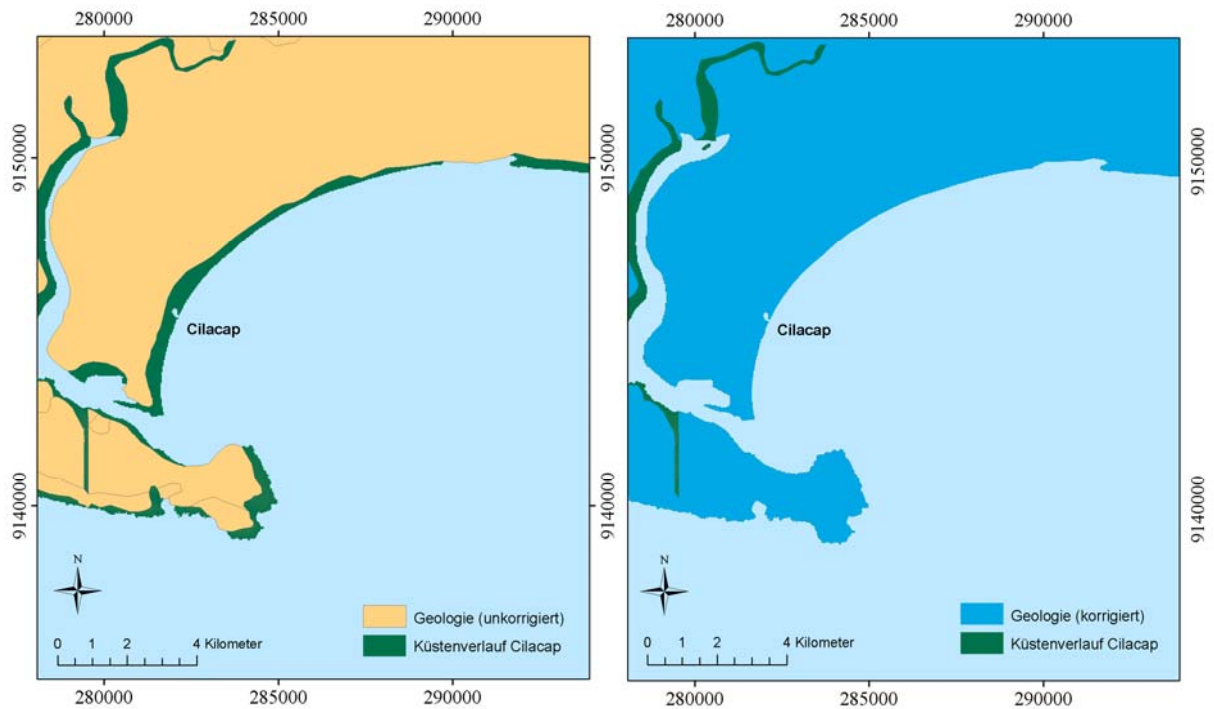


Abbildung 15: Beispiel für die Korrektur einer nicht passgenauen Digitalisierung anhand des Geologie-Shapefiles. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Das Indonesische Institut für Wissenschaft liefert zudem Shapefiles zur *Erdbebengefährdung* Javas. Auch hier sind keine Metadaten vorhanden. Im Rahmen der Methodik in 6.3.1 wird erläutert, wie Erdbebengefahrenkarten erstellt werden können. Das Shapefile weist eine Datenlücke im Süden Cilacaps auf. Um eine resultierende Datenlücke beim Endergebnis zu vermeiden, wurden die Gefahrenbereiche – wie in Abbildung 17 erkennbar – angepasst.

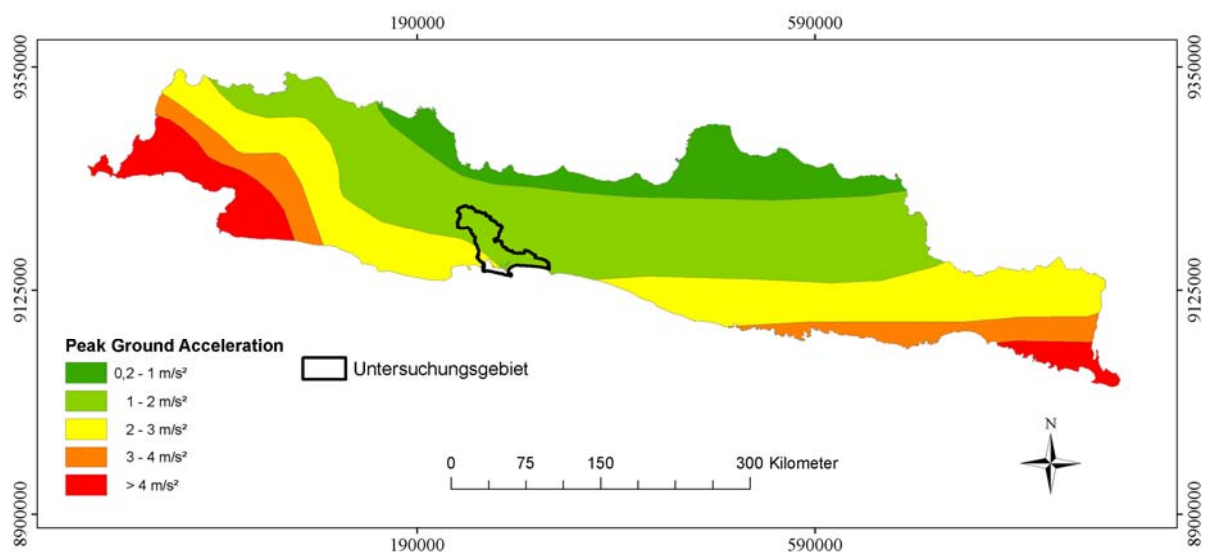


Abbildung 16: Die durchschnittliche, erdbebenbedingte Bodenbeschleunigung auf Java. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.



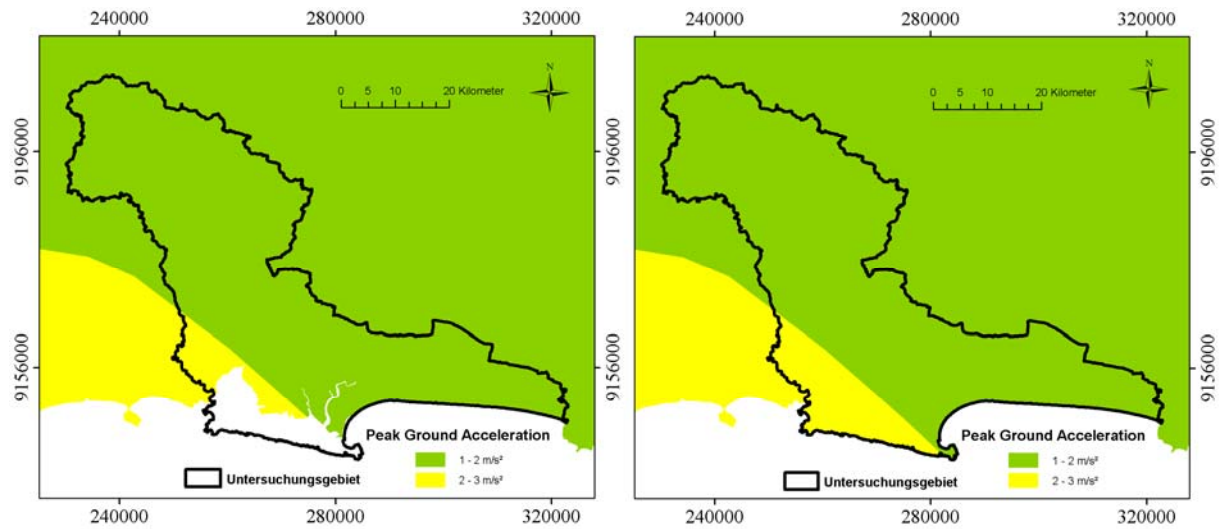


Abbildung 17: Anpassung der Gefährdungsbereiche an das Untersuchungsgebiet. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.



## **6 Methoden der Hazard-Analysen zu Cilacap**

In Kapitel 6 werden fünf Naturgefahrenanalysen durchgeführt. Beginnend mit den gravitativen Massenbewegungen folgt die Analyse potentiell gefährdeter Hochwasserflächen. Daten zur Erdbebengefährdung wurden vom LIPI bereitgestellt. Analysen zu den Tsunamis wurden vom DLR erstellt. Die Vorgehensweisen und Ergebnisse werden für die nachfolgende Multi-Hazard-Analyse implementiert.

Die Einzel-Hazard-Analysen in der vorliegenden Arbeit entsprechen verschiedenen Ansätzen. Die Analyse der gravitativen Massenbewegungen entspricht dem Prinzip des Dispositionsmodells. Die Hochwasseranalyse ist deterministisch, die Erdbebengefährdung statistisch und die Analyse der Tsunamigefährdung probabilistisch fundiert. Sowohl die Problemstellung als auch das methodische Vorgehen werden beschrieben.

### **6.1 Die Methodik bei gravitativen Massenbewegungen**

In Kapitel 6.1 werden die Problemstellung und die Durchführung der Hangrutschungsanalyse dargestellt.

#### **6.1.1 Problemstellung**

Die Modelle geben im Beispiel der Rutschungen zwar Aufschluss über potentiell gefährdete Hanglagen, jedoch nicht über Zeit, Magnitude, Größe, Geschwindigkeit oder kinetische Energie. Diese Faktoren sind allerdings wesentlich für eine Hazardeinschätzung (HUABIN et al. 2005, 550). Welches sind die Faktoren, die eine Rutschung begünstigen, und welche lösen sie letztendlich aus? Die AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY (2007) nennt Beispiele, an welchen Orten Rutschungsereignisse potentiell ausgelöst werden können. Sie ergeben sich aus historischen Daten und Erfahrungen, topographischen sowie geologischen und geomorphologischen Bedingungen, Konstruktionen, die potentiell zu raschen Massenbewegungen führen können, sofern sie versagen, und Landnutzung (vgl. AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY 2007, 17f.).

Innerhalb gewisser Systemgrenzen können Kenntnisse über Schwellenwerte dazu beitragen, Gefahrenhinweise abzuleiten. Erdbeben sind von verschiedenen Faktoren beziehungsweise Schwellenwerten abhängig. HUABIN et al. (2005) beschreiben diese als interne und ex-

terne Variablen. Zu den internen gehören geologische Bedingungen und die Hangneigung, während anthropogene Einflüsse und Starkregenereignisse als externe bezeichnet werden (HUABIN et al. 2005, 550). Im Bereich der Massenbewegungen werden Grenzen von Hangneigungsklassen mit geologischen Faktoren wie der Lithologie verknüpft, um so indirekt die Sensitivität eines Systems zu beurteilen (SCHROTT & GLADE 2008, 137; CARRARA et al. 1999, 125). Topographische Faktoren wie die Hangneigungsgeometrie (Steilheit, Höhe, Länge, Form, Exposition) oder Talcharakteristika sind ebenso wichtig wie die räumliche Verteilung unterschiedlicher Bodentypen (CARRARA et al. 1999, 122). Hinzu kommen klimatische und hydrologische Daten zur Interpretation der Niederschläge als bedeutsamer Auslöser von Massenbewegungen (CARRARA et al. 1999, 127; FELL et al. 2008, 92). Nach VARNES (1984) seien die hydrologischen Bedingungen nach der Schwerkraft der größte Einflussfaktor auf die Hangstabilität (VARNES 1984, 13).

Von entscheidender Bedeutung ist die Hangneigung des zu untersuchenden Gebietes. Je steiler diese ist, desto höher das Gefahrenpotential. Des Weiteren beeinflussen Pedologie und Geologie das Rutschungspotential. Böden unterschiedlicher Korngrößen und Eigenschaften wie Infiltrationsvermögen, Porenvolumen und -größe wirken sich unterschiedlich auf die Hangstabilität aus. Böden mit hohem Infiltrationsvermögen und gleichzeitig schlechtem Wasserrückhaltevermögen neigen zur Instabilität (PRINZ 1997, 276ff.). Ähnliches gilt für geologische Schichtverläufe, die Gesteinsarten und deren Zustand hinsichtlich der Verwitterung. Hydrologische Gegebenheiten wie Flüsse und oberflächennahe Grundwasserspiegel erhöhen ebenso wie aktive Erosion und Unterspülung von Hängen das Gefahrenpotential. Detaillierte Beschreibungen zum Einfluss des Wassers können PRINZ (1997) entnommen werden (vgl. PRINZ 1997, 278). Die Degradation natürlicher Räume durch beispielsweise Abholzung, Baumaßnahmen und Landnutzung kann ebenfalls zu vermehrten Massenbewegungen führen (PRINZ 1997, 279).

Problematisch ist, dass Kenntnisse über die räumliche Verteilung von wesentlichen Parametern häufig nur gering oder überhaupt nicht vorhanden sind (CARRARA et al. 1999, 124). Naturereignisse unterliegen einem komplexen Zusammenspiel dieser Parameter, die nicht effizient gesammelt werden können, teilweise nicht kartierbar oder gar unbekannt sind (CARRARA et al. 1999, 124f.).

Auf Grund diverser Formen sowie unterschiedlicher Risiken von gravitativen Massenbewegungen und räumlich voneinander abweichenden Einflussfaktoren sei es nach FELL et al. (2008) sinnvoll, für jede Rutschungsform eine spezifische Karte zu erstellen. Diese könnten im Anschluss überlagert werden, um ein Gesamtergebnis zu erhalten (FELL et al. 2008, 87,

93). Gleiches behaupten BOLLINGER et al. (2004), die Rutschungen im weiteren Sinne als permanente Rutschungen beziehungsweise Hangkriechen, spontane Rutschungen und Hangmuren klassifizieren. Die Prozesse würden unterschiedliche Gefahrenpotentiale beinhalten und ein differenziertes Gefahren- und Risikomanagement erfordern (BOLLINGER et al. 2004, 5). Dem kann diese Arbeit jedoch, wie bereits in Kapitel 3.2.1 erläutert, nicht gerecht werden. Die Massenbewegungen werden daher nicht weiter differenziert. Allerdings unterscheiden nur wenige Studien Typen von Rutschungen, die Mehrzahl kombiniert sie (VAN WESTEN et al. 2006, 171).

Alle Methoden haben gemeinsam, dass sie Parameter betrachten, die direkt oder indirekt mit der Hanginstabilität korrelieren. Letztendlich wird die Oberfläche zur Erstellung einer Hazard-Map in Parzellen unterschiedlicher Gefährdung unterteilt (HUABIN et al. 2005, 552).

### **6.1.2 Durchführung**

Für die folgende Analyse wird die Studie von HADMOKO et al. (2008) herangezogen. Deren Untersuchungsgebiet befindet sich in einer Gebirgslage der Provinz Yogyakarta, Indonesien. Die Geographie des Gebietes weist eine ähnliche Problemstellung auf (vgl. HADMOKO et al. 2008). Um den Einfluss der physischen Gegebenheiten in der Analyse zu bewerten, werden diese in unterschiedliche Klassen eingeteilt und einem Scoring unterzogen. Je größer der Einfluss einer Klasse auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses, desto höher das Scoring. Anschließend werden die Parameter relativ zueinander gewichtet. Die Gewichtung folgt im Wesentlichen der Studie von HADMOKO et al. (2008), beinhaltet aber auch andere Quellen und auf Grund teilweise abweichender Attribute persönliche Einschätzungen.

Erschwerend kommt hinzu, dass die indonesischen Daten uneinheitlich beschrieben sind und bestmöglich interpretiert werden müssen, um sie zu klassifizieren. HADMOKO et al. (2008) verwenden eine metrische Skalierung beziehungsweise ein metrisches Scoring von 1 bis 5 zur Klassifikation der Parameter (HADMOKO et al. 2008, 10). WACHAL & HUDAK (2001) verfahren in ähnlicher Weise wie HADMOKO et al. (2008), verwenden allerdings ein Scoring von 1 bis 4 (WACHAL & HUDAK 2001, 246). Basierend auf den maximalen und minimalen Scorings sind unterschiedliche Gefahrenkategorien zu klassifizieren. Jeder potentiellen Gefahr wird demzufolge eine Merkmalsausprägung in Form einer Zahl zugeordnet, so dass Mittelwerte und Korrelationen berechnet werden können.

Eine Einschränkung erfolgt durch die Tatsache, dass HADMOKO et al. (2008) fünf Parameter mit einer Gewichtung einbeziehen, die auf einer Expertenbefragung beruht und folglich nicht nachvollziehbar ist (vgl. HADMOKO et al. 2008, 8): das Relief (nicht Exposition oder Hangneigung) (0,36), die Hangneigung (0,36), die Geologie (0,07), die Böden (0,14) sowie die Landnutzung (0,07). Der in der Studie von HADMOKO et al. (2008) verwendete Datensatz zum Relief enthält Informationen zu möglichen Überschwemmungsbereichen, Schwemmlandebenen oder -flächen und dergleichen. Leider sind für Cilacap bis dato keine Daten vorhanden, die mit der Beschreibung dieses Parameters von HADMOKO et al. (2008) äquivalent sind. Dieser Parameter könnte von den bestehenden Daten abgeleitet werden, allerdings wäre dies sehr aufwendig und zeitintensiv. Daher muss auf diesen Parameter verzichtet werden. Daraus resultiert allerdings eine abweichende Gewichtung. Das Relief erhält von HADMOKO et al. (2008) eine erhebliche Gewichtung von 0,36. Dieser Wert wird nach eigener Einschätzung auf die anderen Parameter verteilt.

Die Studie von WACHAL & HUDAK (2001) beinhaltet teilweise andere Parameter, die zudem eine von HADMOKO et al. (2008) erheblich abweichende Gewichtung aufweisen. WACHAL & HUDAK (2001) nehmen Bezug auf vergangene Studien, begründen die Auswahl jedoch nicht weiter. Betrachtet werden Hangneigung, Geologie, Vegetation und geologische Verwerfungen. Die Klasse der Vegetation lässt sich mit der Landnutzung vergleichen. Nach WACHAL & HUDAK (2001) seien die Verwerfungen als wichtiger Faktor zu berücksichtigen, da die Anzahl von Rutschungsereignissen entlang von Störungslinien erhöht sei beziehungsweise mit zunehmender Entfernung von solchen abnehme (WACHAL & HUDAK 2001, 248). Die Bedeutung geologischer Strukturen bestätigt auch PRINZ (1997) (PRINZ 1997, 276). Daten zu den Störungslinien in Cilacap liegen vor und werden daher in der Analyse berücksichtigt.

Die Gewichtung wurde unter Berücksichtigung der Studien von HADMOKO et al. (2008) und WACHAL & HUDAK (2001) erstellt. Da sich deren Gewichtungen trotz teilweise gleicher Parameter erheblich unterscheiden, wird ein Mittelwert gewählt. Durch eine subjektive Einschätzung wird dieser Mittelwert gegebenenfalls weiter angepasst (modifizierte Gewichtung). Die Gewichtungsveränderungen resultieren aus folgender Begründung: Die Hangneigung erfährt wie bei HADMOKO et al. (2008) und WACHAL & HUDAK (2001) das höchste Gewicht von 0,35, da sie den bedeutendsten Faktor darstellt. Dies lässt sich damit begründen, dass theoretisch keine Rutschungen möglich sind, sollte die Hangneigung Null betragen. Wie zuvor erläutert, ist das Gefahrenpotential umso höher, je steiler ein Hang ist.

Die Geologie wurde anhand der Referenzstudien gemittelt. Die Landnutzung erhält gegenüber den Böden eine höhere Gewichtung, da sie mit der Bedeckung der Erdoberfläche

sowohl Hangstabilität als auch Wasserrückhaltevermögen erheblich positiv beeinflusst. WACHAL & HUDAK (2001) betonen an dieser Stelle, dass Gebiete mit dichter Vegetation eine geringere Gefährdung aufweisen als spärlich bewachsene Böden. Zudem würden Siedlungsbereiche und agrarische Landnutzung das Gefahrenpotential erhöhen (WACHAL & HUDAK 2001, 248; VARNES 1984, 14. Diese Aussage stimmt mit dem Scoring von HADMOKO et al. (2008) überein und spiegelt sich in der Tabelle 3 wider.

Die Böden spielen auf Grund des Infiltrationsvermögens und der Wasserspeicherfähigkeit zwar eine ebenso bedeutende Rolle, sind im Vergleich zur Landnutzung allerdings eher sekundär, wenn der Niederschlag als hauptsächlicher Auslöser und folglich der Wasserkreislauf betrachtet werden. Die Vegetation nimmt insbesondere durch die Interzeption starken Einfluss auf die Wassermenge, die den Boden erreicht. Sie verringert die Erosion und hält Niederschlag auf den Blattflächen zurück (vgl. BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1995, 72ff.).

Orientiert an der Studie von WACHAL & HUDAK (2001) erhalten die geologischen Störungen ein Gewicht von 0,15. Da Java angesichts seiner geographischen Lage entlang einer Subduktionszone in einem tektonisch aktiven Gebiet liegt, erscheint dieser verhältnismäßig hohe Wert als gerechtfertigt.

*Tabelle 1: Gewichtung der Parameter*

<b>Parameter</b>	<b>Gewichtung nach HADMOKO et al. (2008)</b>	<b>Gewichtung nach WACHAL &amp; HUDAK (2001)</b>	<b>Modifizierte Gewichtung</b>
Relief	0,36	-	-
Hangneigung	0,36	0,35	0,35
Geologie	0,07	0,3	0,15
Böden	0,14	-	0,15
Landnutzung	0,07	0,2	0,2
Geologische Störungen	-	0,15	0,15

In der Literatur (HADMOKO et al. 2008 & WACHAL & HUDAK 2001) wird der Hangneigungswert von null Prozent bei der Gefahrenstufe 1 mit einbezogen. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass in der Praxis bei einer Hangneigung von null Prozent keine gravitativen Massenbewegungen möglich sind. Darüber hinaus unterliegt die Festlegung eines solchen Schwellenwertes der Einschränkung, dass das Gefahrenpotential der Hangneigung stark

von den anderen Rahmenfaktoren abhängig ist. Die Komplexität erlaubt hier theoretisch keine absolute Festlegung (VARNES 1984, 11). Auch PRINZ (1997) bestätigt dies und gibt trotz ausführlicher Beschreibung diverser Rutschungsformen keinen Schwellenwert an. Der Einfluss weiterer Faktoren, insbesondere der des Niederschlags, sei erheblich (PRINZ 1997, 297f.).

Da langsame Rutschungsformen wie Hangkriechen für diese Studie nicht von Interesse sind, wird der Hangneigungswert willkürlich festgelegt. Als möglicher Schwellenwert wird eine Hangneigung von 5 Prozent angenommen. Das erste Intervall wird demnach von 5 bis 8 Prozent angepasst.

*Tabelle 2: Scoring der Hangneigung*

<b>Hangneigung (in %)</b>	<b>Scoring nach HADMOKO et al.</b>
0 - 5	0
5 - 8	1
8 - 15	2
15 - 25	3
25 - 45	4
> 45	5

*Tabelle 3: Scoring der Landnutzung*

<b>Landnutzung</b>	<b>Scoring</b>	<b>Klassifikation nach HADMOKO et al. (2008)</b>	<b>Scoring nach HADMOKO et al. (2008)</b>
See, Moor, Wasser	0	-	-
Wald	1	Wald	1
Andere Vegetation, Andere, Busch, Mangrove, Siedlung	2	Mischwald	2
Feldfrüchte; Gras; Plantage	3	Gartenbau	3
Reisfeld	4	Reisfeld, Siedlung	4
Sand; offenes Land	5	Trockenfeldbau	5

Die Beschreibungen der Landnutzungsklassen für Cilacap werden mit denen von HADMOKO et al. (2008) verglichen und ein entsprechendes Scoring zugewiesen. Da bei stehenden Gewässern keine Massenbewegungen vorkommen, erhalten die Klassen *See/Moor/Wasser* als

Sonderfall ein theoretisches Scoring von 0 und werden bei dem Endergebnis als ungefährdete Bereiche ausgewiesen. Die Berechnung erfolgt parallel mit den Ausschlusskriterien des Parameters der Hangneigung.

*Siedlung* und *Reisfeld* erhalten nicht dasselbe Scoring. Grund hierfür ist, dass es sich beim Untersuchungsgebiet von HADMOKO et al. (2008) um eine reine Gebirgs- und Hügellandschaft handelt, während die Siedlungsbereiche Cilacaps überwiegend in Bereichen niedriger Hangneigung beziehungsweise in eher ebenen Flächen liegen. Für Cilacap erscheint das Scoring für die Siedlung auf Grund einer geringeren Hangneigung als zu hoch und wird auf den Wert 2 herabgesetzt.

Tabelle 4: Scoring der Geologie

Geologie	Klassifikation nach HADMOKO et al. (2008)	Scoring nach HADMOKO et al. (2008)
Schwemmland (Kies, Sand, Lehm) Schwemmkegel (Laterit, andesitische Kiese, Gerölle, tuffige Sande)	Alluvium Vulkanisches Alluvium	1
Korallenkalke	Klastisches Kalkgestein	2
Mergel, Ton	Mergel	3
Schiefer	Plutonische Intrusionen	4
Vulkanische/andesitische Brekzien, Lava/Tuff, tuffiger Sandstein, Kalkstein	Nicht-klastisches Kalkgestein, andesitische Brekzien, Sandstein	5

Nach PRINZ (1997) sind wasserwegsame Schichten wie Basalte, Kalksteine, Sandsteine, Kiese und Sande auf toniger oder tonig-mergeliger Unterlage beziehungsweise in Wechschichtung besonders anfällig für Rutschungen. Allerdings lassen sich die geologischen Voraussetzungen sehr detailliert erweitern (vgl. PRINZ 1997, 276f.). Solche Verhältnisse werden für Cilacap beschrieben.

Mit den geologischen Daten für Cilacap wird gleichermaßen verfahren. Sie werden mit denen von HADMOKO et al. (2008) verglichen und entsprechend interpretiert. Sofern der Fall vorliegt, dass eine Beschreibung mehrere Attribute (verglichen mit der Beschreibung nach

HADMOKO et al. (2008)) und damit ein theoretisch unterschiedliches Scoring aufweist, so wird der Scoringwert gemittelt. Beispielsweise wurde die *Halang Formation* wie folgt beschrieben: tuffige Sandsteine, Konglomerate, Mergel, Tonstein und in geringem Ausmaß andesitische Brekzien. Mergel und Tonstein erhalten ein Scoring von 3 (Mergel erhält nach HADMOKO et al. (2008) das Scoring 3, Ton wird nicht berücksichtigt. Allerdings enthält Mergel zu großen Anteilen Ton, weshalb Ton ebenfalls der Wert 3 zugeordnet wird), tuffige Sandsteine und andesitische Brekzien einen Wert von 5. Daraus resultierend wird der *Halang Formation* ein Scoring von 4 zugewiesen.

Tabelle 5: Scoring der Böden

Boden	Scoring	Klassifikation nach HADMOKO et al. (2008)	Scoring nach HADMOKO et al. (2008)
Alluvialböden	1	Complex Trophorthents Eutropepts Hapludalfs, Eutropepts	1
Latosole	2	Association Pelludert Epiaquepts, Tropafluents, Association Hapludalf Eutropepts, Association Trophaquepts Eutropepts, Association Pelluderts Eutropepts, Association Hapludalfs ; Trophorthents, Dystropepts, Endoaquepts ; Epiaquepts, Association Cromusderts Eutropepts, Association Tropafluents Eutropepts, Hapludalfs	2
Grumosole	3	Association Hapludalfs Trophorthents, Trophorthents	3
Regosole	4	Association Epiaquepts Endoaquepts	4
Lithosole, Eutropepts	5	Complex Trophorthents Eutropepts, Association, Eutropepts, Dystropepts, Complex Eutroprpts Pelluderts Trophorthents, Tropopsamments, Association Eutropepts Pelluderts, Association trophorthents Dystropepts, Association Trophorthents, Pelluderts, Pelluderts	5



Die Bodengruppen nach HADMOKO et al. (2008) entsprechen diversen Subgruppen der USDA Klassifikation. Es ist keine weitere Beschreibung vorhanden, die das Scoring begründet und einen Vergleich mit den indonesischen Daten ermöglicht. Diese gehen größtenteils nicht über die Beschreibung der Bodenfarbe hinaus und enthalten keinerlei bodenphysikalische Informationen. Genannt werden:

- *Regosole* (FAO Klassifikation)  
(HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997, 136)
- *Lithosole* (alte FAO Klassifikation, entsprechen den Leptosols nach der FAO) (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997, 162)
- *Alluvialböden* (vgl. Fluvisole: FAO Klassifikation)  
(HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997, 10)
- *Grumosole* (frühere Bezeichnung in den USA für einen Subtyp des Vertisols (FAO Klassifikation)  
(HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997, 116)
- *Latosole* (ältere Bezeichnung für Ferralsols und Oxisols)  
(HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997, 159)
- *Eutropepts* (genaue Klassifikation unbekannt)

Auf Grund der Verwendung veralteter Bodenbezeichnungen unterschiedlicher Klassifikationen innerhalb der indonesischen Datensätze werden die aktuell äquivalenten Bodentypen zur Interpretation herangezogen. Anschließend werden die Böden einem Scoring nach eigener Einschätzung unterzogen, die im Folgenden begründet wird.

Der bedeutende Einflussfaktor des Bodens auf gravitative Massenbewegungen ist der Wassergehalt eines Bodens. Je höher der Wassergehalt, desto größer ist das Eigengewicht und desto geringer sind innere Reibung und Haftung des Bodens. Demzufolge gerät ein Hang bei gleichen Bedingungen (wie z.B. der Hangneigung) umso leichter in Bewegung, je mehr Wasser er enthält (HAGEN 2006, 13f.). Entsprechend werden für das Scoring Eigenschaften betrachtet, die sich auf Speicherfähigkeit und Infiltrationsvermögen auswirken.

Regosole sind Rohböden mit lockerem, mittel- bis feinkörnigem Substrat. Sie verfügen über eine geringe Wasserspeicherleistung, allerdings eine gute Durchwurzelung (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997, 236). Dies ließe darauf schließen, dass Regosole ein relativ hohes Infiltrationsvermögen besitzen. Nach KUNTZE et al. (1994) seien Eigenschaften wie Wasserkapazität und Sorptionsvermögen von der Körnung und den mineralischen Komponenten im

Ausgangsgestein abhängig. Leider sind solche Informationen in den Daten nicht verfügbar. Es ist anzunehmen, dass Regosole eine schnelle Wassersättigung erreichen, das Wasser jedoch nicht lange speichern können. Daraus würde eine höhere Gefährdung für Massenbewegungen resultieren. Die Regosole bekommen demzufolge ein Scoring von 4 zugewiesen.

Lithosole beziehungsweise Leptosole sind flachgründige, schwach entwickelte und skelettreiche Böden. Sie weisen eine geringe Wasserspeicherfähigkeit auf und bilden sich vorwiegend in Gebirgen oder an felsigen Hängen. Je nach Landnutzung neigen diese Böden zur verstärkten Erosion (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH 1997, 10, 160). Diese Faktoren lassen auf einen erheblichen positiven Einfluss auf Hangrutschungen schließen, weshalb diese Klasse ein Scoring von 5 erhält. Nach SCHULTZ (2000) gehören steinige Regosole ebenso zu den Leptosolen (SCHULTZ 2000, 86), was das Scoring von 4 für die Regosole stützt.

Die Alluvialböden zählen zu den Fluvisolen beziehungsweise Schwemmlandböden. Es handelt sich um junge Böden auf alluvialen Ablagerungen mit geringer Profildifferenzierung in den Auen oder Marschen (SCHULTZ 2000, 56, 241). Demzufolge sind solche Böden in Niederungen zu finden und nicht an exponierten Hängen, die das Abrutschen begünstigen würden. Diese Böden korrelieren mit den geologischen Daten, die nach HADMOKO et al. (2010) ein Scoring von 1 zugewiesen bekommen.

Grumosole beziehungsweise Vertisole sind tonreiche Böden, die in Talniederungen, Senken, am Hangfuß oder in Plateaulagen vorkommen. In der Trockenzeit bilden sich durch Zunahme des Porenvolumens tiefe Trockenrisse. Die Wasserspeicherfähigkeit ist durch den beträchtlichen Tonanteil sehr hoch, allerdings resultiert daraus in der Regenzeit ein periodischer Wasserstau sowie eine niedrige Luftkapazität (SCHULTZ 2000, 299). Demnach ist das Infiltrationsvermögen niedrig und die Bodenstabilität mit einem ausgeprägten ABC-Profil gut. Dennoch könnten Risikofaktoren durch die Verschlämmung des ausgetrockneten Oberbodens bei Starkregen (SCHULTZ 2000, 298) sowie der periodische Wasserstau durch Sättigung des Oberbodens bestehen. Dies ließe auf ein mittleres Gefahrenpotential schließen. Die Grumosole erhalten demnach ein Scoring von 3.

Latosole beziehungsweise Ferralsole sind intensiv verwitterte und tiefgründige Böden mit hohen Tongehalten, bei gleichzeitig guter Wasserdurchlässigkeit. Sie weisen ein stabiles Gefüge auf und sind gering erosionsgefährdet. Auf Grund dieser Eigenschaften erhalten diese Böden ein niedriges Scoring von 2.

Tabelle 6: Scoring der Störungslinien (Buffer)

Buffer	Scoring nach Wachal & Hudak (2001)
> 1550 m	1
1200 - 1550 m	2
850 - 1200 m	3
500 - 850 m	4
< 500 m	5

Die Störungslinien werden nach WACHAL & HUDAK (2001) mit *Buffern* versehen, um unterschiedliche Gefährdungsbereiche auszuweisen. Da in deren Studie ein Scoring von vier Klassen angewendet wird (WACHAL & HUDAK 2001, 248), in der jetzigen allerdings fünf verwendet werden, muss der Gefahrenbereich um die Störungslinie um ein Intervall erweitert werden. Da die Autoren keine begründete Angabe zur Größe der Buffer machen (WACHAL & HUDAK 2001, 248), erscheinen die gewählten Abstände willkürlich. Um mathematisch sinnvolle Intervalle bilden zu können, wird der letzte Buffer im Vergleich zu WACHAL & HUDAK (2001) um 50 Meter vergrößert. Da es sich um den Bereich handelt, der sowohl die größte Fläche als auch das niedrigste Scoring aufweist, scheint diese Modifikation im Vergleich zu WACHAL & HUDAK (2001) keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis zu nehmen.

Die Gefahrenbereiche werden mit Hilfe des *Buffer-Tools* in ArcGIS ermittelt. Je größer der Abstand von den Störungslinien wird, desto niedriger wird das Scoring. Da der potentielle Einfluss der Störungen immer kleiner wird, aber prinzipiell nie signifikant null ist, erhält dieser Parameter auch keinen Wert 0 im Scoring.

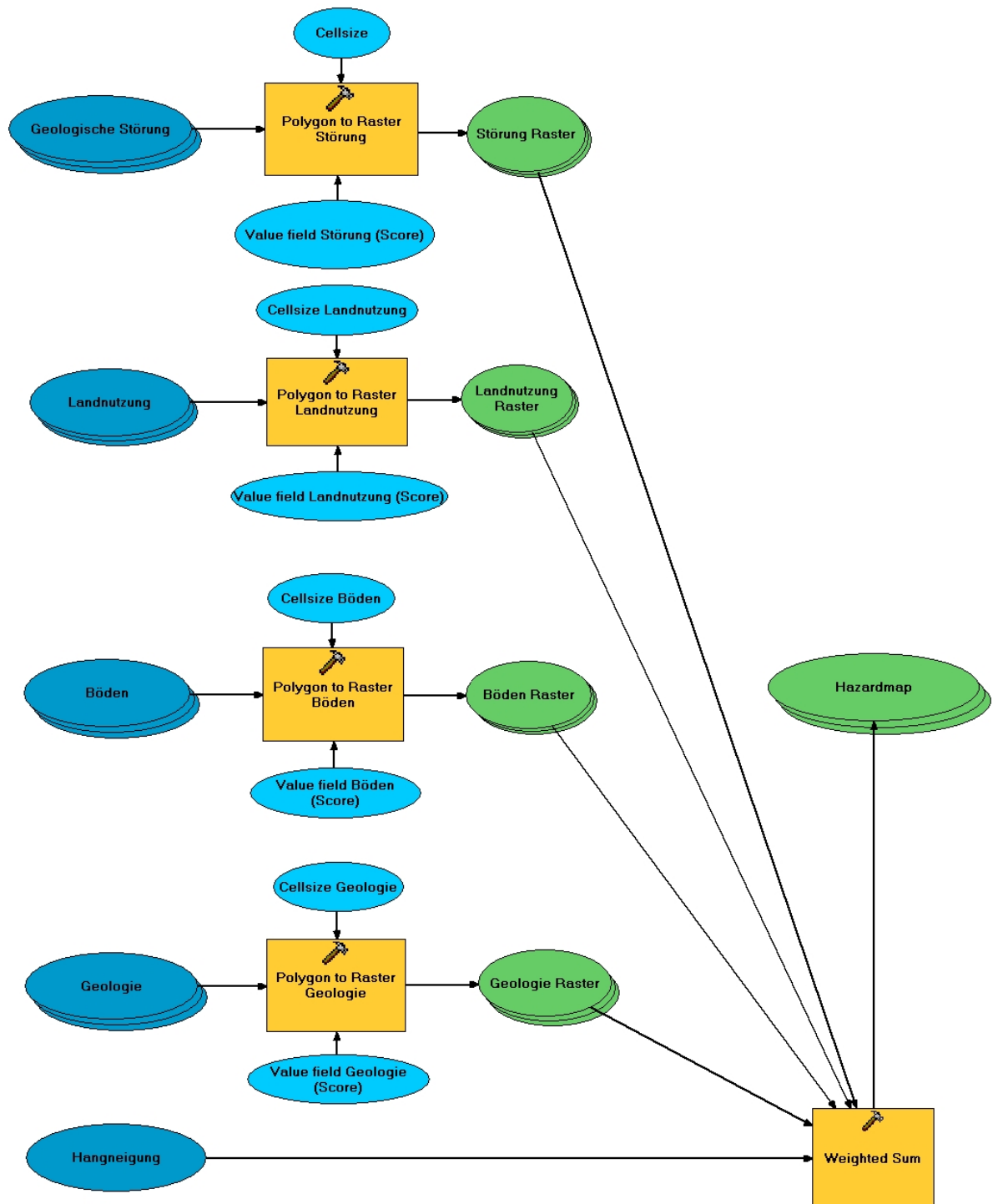


Abbildung 18: Prozessbaum der einzelnen Analyseschritte. Erstellt mit dem Model Builder in ArcGIS. Quelle: Eigener Entwurf.

Die Analyse wird mit ArcGIS durchgeführt. Nach der Vorbereitung und Korrektur der Daten wird zur Vereinfachung der Prozesse mit dem *Modelbuilder* ein Prozessbaum angelegt, der die einzelnen Analyseschritte beinhaltet. Dadurch werden manuelle Schritte und damit auch die Fehleranfälligkeit zwischen den Schritten minimiert. Einzelne Parameter können bei

Bedarf gezielt verändert und das Ergebnis neu berechnet werden. Input (dunkelblau) sind die zuvor aufbereiteten Daten zu Cilacap: die Landnutzung, die Böden, die Geologie, geologische Störungen sowie die Hangneigung. Um diese Faktoren weiterzuverarbeiten, müssen sie zuvor mit dem Tool *Polygon to Raster* in Rasterdatensätze konvertiert werden. Landnutzung, Böden und Geologie liegen bis zu diesem Zeitpunkt als Vektordaten vor, bei den Daten der Hangneigung handelt es sich bereits um ein Rasterformat. Zusätzliche Parameter (hellblau) sind hierfür notwendig: Ein Parameter (*Score*/hellblau) sorgt dafür, dass das Raster auf den jeweils beinhalteten Scorings basierend erstellt wird. Die *Cellsize* wird entsprechend der maximalen Auflösung des DEM auf 30 Meter (abgerundet) festgelegt. Die vier Raster werden nun – wie zuvor beschrieben – überlagert und in einem weiteren Analyseschritt mit dem Tool *Weighted Sum* einer Gewichtung unterzogen:

$$\text{Score}_{\text{Ges}} = (0,35 * \text{Score}_{\text{Hangneigung}} + 0,15 * \text{Score}_{\text{Geologie}} + 0,15 * \text{Score}_{\text{Böden}} + 0,20 * \text{Score}_{\text{Landnutzung}} + 0,15 * \text{Score}_{\text{Störungslinien}})$$

Zu diesem Zeitpunkt sind die gesamten Hangneigungswerte sowie die Klassen See/Moor/Wasser noch im Ergebnis enthalten. Zuvor wurde erläutert, dass zum Einen die Hangneigung erst ab einer bestimmten Steigung ein Gefahrenpotential aufweist und zum Anderen die genannten Landnutzungsklassen keine Gefahr bilden. Durch einen weiteren Analyseschritt werden diese Annahmen in das bisherige Ergebnis implementiert. Mit Hilfe des *Raster Calculator* in ArcGIS kann die Bedingung formuliert werden, der zufolge alle Bereiche, die sowohl eine Hangneigung kleiner als 5 Prozent als auch die Klassen See/Moor/Wasser enthalten, ein Scoring von 0 zugeordnet bekommen.

Die Klassen wurden aus dem Landnutzungslayer exportiert und zur weiteren Berechnung in ein Raster  $X_a$  konvertiert. In einem weiteren Schritt wird dieses mit dem Tool *Reclassify* umgewandelt, um folgende Bedingung zu erfüllen:

- keine Daten entsprechen dem Wert 1
- See/Moor/Wasser erhalten den Wert 0

Parallel wurde das bisherige Hangneigungsrastrer per *Raster Calculator* in ein weiteres Raster  $X_b$  umgewandelt, um die Bedingung zu erfüllen:

- Hangneigung ist kleiner 5, dann 0
- Hangneigung ist größer 5, dann 1

Anschließend werden die Raster  $X_a$  und  $X_b$  mit dem *Raster Calculator* miteinander multipliziert, woraus sich ein Raster  $X_c$  mit folgenden Eigenschaften ergibt:

- 0 entspricht Hangneigung kleiner 5 und See/Moor/Wasser
- 1 entspricht Hangneigung größer 5 und kein See/Moor/Wasser

Das Raster  $X_c$  aus den vorangegangenen Schritten wird nun mit dem Analyseergebnis – das sich aus dem Prozessbaum des Model Builder ergibt – erneut mit Hilfe des Raster Calculator multipliziert. Durch die Multiplikation der Werte mit Null erhalten die Bereiche, die als ungefährdet gelten, ein Scoring von 0. Die Werte aus dem Analyseergebnis bleiben durch die Multiplikation mit eins hingegen unverändert. Die Gefahrenkarte für Hangrutschungen wird in Kapitel 7.1 dargestellt und detailliert beschrieben.

## **6.2 Die Methodik bei Hochwasser**

In Kapitel 6.2 werden die Problemstellung und die Durchführung der Hochwasseranalyse dargestellt.

### **6.2.1 Problemstellung**

Hochwasser variieren stark in Intensität, Dauer und Häufigkeit. Zudem treffen sie häufig dasselbe Gebiet mehrmals (WISNER et al. 2006, 205). Die Flüsse Javas weisen zunehmend höhere Hochwasserstände durch intensive Regenfälle und geringere Niedrigwasserstände während der Trockenperioden auf (RUNTUNUWU & PAWITAN 2008, 61).

Es kommt zu einem Hochwasser, wenn der Abfluss einen Schwellenwert überschreitet (MERZ 2006, 78). Der Abfluss wird unter anderem von den Bodenarten bestimmt. Die Reaktion des Bodens auf Niederschläge hängt von Infiltrationsvermögen, Durchlässigkeit und Speichervermögen ab (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996, 528). Die wesentlichen Faktoren, die den Abfluss und damit Hochwasserereignisse beeinflussen, sind die Größe des Einzugsgebietes, die Form des Einzugsgebietes, die Flusssichte, die topographische Höhe, die Gefälleverhältnisse, die Landschaftsform, die Geologie, die Vegetation, anthropogene Einflüsse und nicht zuletzt die Ausprägung der Niederschläge (vgl. BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996, 521-539). Jeder dieser Parameter kann hinsichtlich seines Einflusses weiter erläutert werden, allerdings ist dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Hochwasserereignisse sind von einem Wechselspiel verschiedener Faktoren abhängig, die einen hohen Zufallsanteil beinhalten. Dieser Problematik wird in der Regel mit probabilistischen Ansätzen entgegengetreten. Die Zufallsparameter werden auf wenige beschränkt. Deterministische Annahmen, z.B. das mittlere Verhalten, sind die häufigste Wahl (MERZ 2006, 175).

Die Hochwassergefahreinschätzung basiert nach DUTTA et al. (2003) auf der Betrachtung der hydrologischen Gegebenheiten wie Fließgeschwindigkeit und Gewässertiefe sowie der anthropogenen Einflüsse auf die hydrologischen Charakteristika (DUTTA et al. 2003, 25). Beispielsweise werden auf Java zwischen 20 und 24, selten auch über 30 Prozent der Beckenlagen mit Nassreisfeldern bewirtschaftet. Die maximale Tragfähigkeit läge für Reisfelder al-

lerdings bei 20 Prozent. Dies führt zu einer Verschärfung der Hochwassergefahr (RUNTUNUWU & PAWITAN 2008, 60).

GRÜNTAL et al. (2006) zufolge werden Fluthäufigkeiten analysiert, die auf den Abflussraten – für jedes hydrologische Jahr wird der höchste Pegelstand bestimmt – basieren. Die Schätzung von Wasserständen zur Modellierung von Überflutungsbereichen erfolge beispielsweise unter Berücksichtigung von digitalen Geländemodellen (GRÜNTAL et al. 2006, 26f.). Es gibt nach DUTTA et al. (2003) eine Vielzahl variierender und lediglich eine kleine Zahl an standardisierten Methoden zur Gefahreinschätzung von Hochwasser (DUTTA et al. 2003, 24f.). Hinzu kommen große Ungewissheiten auf Grund erheblicher Unterschiede in den jährlichen Wasserhöchstständen sowie durch eine Vielzahl methodischer Ansätze zur Abschätzung der bedeutenden Parameter (GRÜNTAL et al. 2006, 27).

Die Auswahl einer Methode hängt vom Ausmaß und der Qualität vorhandener Daten, der gewünschten Genauigkeit sowie dem Zeit- und Kostenaufwand ab. Eine einfache Extrapolation der Strömungsverhältnisse ist mit geringem Aufwand möglich, detaillierte Modellierungen hingegen erfordern lange Datenreihen und damit erheblichen Zeitaufwand (WHARTON & TOMLINSON 1999, 98). Diverse Faktoren können für eine Hochwasseranalyse berücksichtigt werden: Die Topographie, das Klima und durchschnittliche Jahresniederschläge bilden laut MEIGH et al. (1997) die Basis, von Vorteil wären Daten zu Geologie, Böden, Landnutzung und Vegetation (MEIGH et al. 1997, 229). Drainagen, Bodeneigenschaften, die Größe des Einzugsgebiets und die Größe urbaner Räume sind weitere Einflussgrößen, die bei hydrologischen Modellen von Bedeutung sind. Regionen mit Nassreiskulturen, wie sie auch in Cilacap vorhanden sind, erfahren ebenso wie urbane Räume besondere Beachtung, da sie erheblichen Einfluss auf den Abfluss nehmen (WHARTON & TOMLINSON 1999, 99).

Von signifikanter Bedeutung sind auch anthropogene Eingriffe wie Deiche und Talsperren. Dämme können das Hochwasserrisiko verringern, allerdings im Zuge mangelhafter Bauweise oder inadäquater Standards durch Brechen des Damms Sturzfluten verursachen (WISNER et al. 2006, 206). Starke Niederschläge und Sturzfluten stehen in enger Relation zu gravitativen Massenbewegungen (WISNER et al. 2006, 214). Natürliche Dämme bilden sich auch durch Rutschungsmassen, die Täler und damit die Fließwege von Flüssen blockieren. Diese werden früher oder später durch zunehmende Erosion brechen und ebenfalls Sturzfluten auslösen. WISNER et al. (2006) betonen an dieser Stelle die Bedeutung der globalen Erwärmung, die durch Rückzug des Eises zunehmend instabile Hänge im Gebirge zur Folge haben wird. Daraus wird eine erhöhte Frequenz von Rutschungen resultieren (WISNER et al. 2006, 212f.). Die Beurteilung von Wahrscheinlichkeiten für das Versagen von Flussdeichen ist schwierig.



Sie unterliegen räumlich und zeitlich variierenden Unsicherheiten in Form von geologischen, boden-mechanischen und hydraulischen Parametern. Deichbrüche seien allerdings selten, im Gegensatz zu Talsperrenbrüchen (vgl. MERZ 2006, 128f.). Die Modellierung solcher Gefahren ist jedoch in dieser Studie von geringer Bedeutung, da die aufgestauten Wassermengen ein Gefahrenpotential für die Unterlieger darstellt. Solche Bereiche werden durch diese Hazard-Analyse nicht erfasst, lediglich die Bereiche, in denen ein Naturereignis potentiell auftreten kann.

Eine Möglichkeit zur Ableitung eines Hochwasserszenarios bietet ein statisches Szenario. Von allen Messstationen wird der 100-jährliche Abfluss bestimmt. Allerdings handelt es sich hierbei um eine Situation, die in dieser Art in der Realität nicht eintritt, da verschiedene Gebiete je nach Größe des Einzugsgebietes unterschiedlich betroffen sind. Dies hat Auswirkungen auf die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses (MERZ 2006, 175).

Eine Möglichkeit zur vereinfachten Modellierung der Überschwemmungsflächen ist das rasterbasierte, statische Modell FLOODMAP. Dieses simuliert Überschwemmungsbereiche, die eine direkte Anbindung zum Vorfluter aufweisen. Allerdings bleiben grundwasserbedingte Hochwasser unbeachtet. Solche Simulationen beziehen sich stets auf bestimmte Pegelstände, die aus historischen Aufzeichnungen von Hochwasserereignissen gewonnen werden (UHRICH 2002, 61), jedoch sind solche Daten für Cilacap nicht verfügbar. Auch MERZ (2006) betont die Notwendigkeit historischer Aufzeichnungen, die für die Vertrauenswürdigkeit von Risikoabschätzungen erforderlich sind. Gerade bei Hochwassermodellierungen sei die Verfügbarkeit solcher Daten sehr gering, unvollständig und unsicher (MERZ 2006, 77f.).

Zur Validierung der Ergebnisse werden bestenfalls Luftbilder von vergangenen Hochwassern herangezogen. Die Überflutungsflächen können mit entsprechenden Methoden klassifiziert oder digitalisiert und anschließend mit dem Simulationsergebnis verglichen werden (UHRICH 2002, 65f.). Für Cilacap stehen auch solche Daten nicht zur Verfügung.

### **6.2.2 Durchführung**

Da eine geringe Datenverfügbarkeit besteht, wurde im Rahmen dieser Arbeit der TOPMODEL-Ansatz zur Hochwasseranalyse verwendet. Dieser Ansatz wird nach SEIFERT (2006) zur Modellierung von Bodenwasserbewegungen, geochemischen Ausflüssen, Evapotranspiration, Erosion sowie Sedimentation herangezogen und basiert auf der Verbindung von Topographie und Strömungsrichtung in Zeit und Raum. Ein *topographischer Index* stellt für jeden Raster-

punkt eine theoretische Schätzung für das Strömungsverhalten eines Flusses dar. Dadurch lassen sich Herkunft und Einzugsgebiet sowie der gesättigte Oberflächenabfluss und der gesättigte Zwischenabfluss ableiten (QUINN et al. 1995, 161ff.). Der *Topographische Index TI* ergibt sich aus folgender Formel nach SEIFERT (2006):

$$(1) \quad TI = \ln \left( \frac{a}{\tan \beta} \right)$$

$$(1.1) \quad a = \left( \frac{\text{Fließakkumulation} * (\text{Cellsize})^2}{\text{Cellsize}} \right)$$

$a$  = Oberliegerfläche

$$(1.2) \quad \tan \beta = \left( \frac{\text{Hangneigung} (\%)}{100} \right)$$

$\tan \beta$  = lokaler Hangneigungswinkel

(SEIFERT 2006, 3)

Der Ansatz basiert auf zwei grundlegenden Annahmen: Erstens kann die Dynamik des Grundwasserspiegels näherungsweise durch einen einheitlichen Grundwasserabfluss pro Flächeneinheit im Untersuchungsgebiet  $a$ , das in einen Punkt entwässert, ermittelt werden. Zweitens erfasst die Hangneigung der lokal vorherrschenden Topographie  $\tan \beta$  nahezu den hydraulischen Gradienten der gesättigten Bodenzone (BEVEN 1997, 1071).

Wird der Faktor Boden miteinbezogen, kann der *Bodentopographische Index STI* (Soil Topographic Index) ermittelt werden:

$$(2) \quad STI = TI - \ln(KsD)$$

KsD: laterale Wasserbewegung im Bodenprofil

Der topographische Index wird häufig herangezogen, um das Fließverhalten auf der Makroebene zu visualisieren (QUINN et al. 1995, 161f.). Entscheidend ist die Rasterzellengröße, da sie direkten Einfluss auf die Berechnung des Index hat. Gewöhnlich werden DHM mit einer Auflösung zwischen einem und 50 Metern verwendet. Eine Auflösung von 100 Meter oder höher kann die topographischen Gegebenheiten nicht ausreichend erfassen. Entsprechend wären die hypothetischen Abflussrichtungen zu ungenau (QUINN et al. 1995, 163).

Der Parameter KsD beschreibt sowohl die Durchlässigkeit des Bodens ( $K_s$ ) als auch die Bodentiefe ( $D$ ) (SEIFERT 2006, 3). KsD entspricht dem Durchlässigkeitsbeiwert ( $K_f$ -Wert) des Bodens (QUINN et al. 1995, 164). Sind diese Daten nicht vorhanden, wird KsD als eine Konstante betrachtet. Dies hat zur Folge, dass die hypothetische Abflussrichtung allein durch die Topographie ermittelt und der Einfluss des Bodens vernachlässigt wird. Der topographische Index wird so interpretiert, dass eine Rasterzelle dasselbe oder ähnliche hydrologische Verhalten wie eine benachbarte Rasterzelle mit gleichem oder ähnlichem Index aufweist (QUINN et al. 1995, 164). Auf Grund der starken Generalisierung der Bodendaten für Cilacap sind die  $K_f$ -Werte und die Bodenmächtigkeiten nicht ermittelbar. Durchschnittswerte für die jeweiligen Obergruppen der Böden würden das Ergebnis stark verfälschen. Daher wird für die folgende Analyse der Boden als Konstante angenommen. Es wird lediglich zwischen unversiegelten Böden und bebauter Fläche unterschieden. Es ist anzunehmen, dass die versiegelte Fläche den oberflächlichen Abfluss begünstigt und somit die Fließakkumulation erhöht. Die versiegelte Fläche lässt sich aus dem Landnutzungsdatensatz ableiten.

Zur Berechnung des TI muss zunächst die *Fließakkumulation* (Flow Accumulation) berechnet werden. Dies erfordert zuvor die Berechnung der *Fließrichtung* (Flow Direction). Beide können in ArcGIS aus dem DHM abgeleitet werden. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass für die Berechnung der Hydrologie das DHM über das Untersuchungsgebiet hinaus betrachtet wird, um den topographischen Einfluss der näheren Umgebung mit einzubeziehen. Das Ergebnis wird im Anschluss mittels des *Clip Tools* in ArcGIS auf das Untersuchungsgebiet begrenzt. Um Fehler bei der Simulation der Flow Direction zu verringern (QUINN et al. 1995, 162), werden künstliche Senken im DHM durch das Tool *Fill* aufgefüllt. Nach TARBOTON et al. (1991) reicht der Anteil solcher Senken in einem DHM mit einer Auflösung von 30 Metern von 0,9 bis 4,7 Prozent (TARBOTON et al. 1991, 86). Der Anteil künstlicher Senken kann demnach erheblich sein, weshalb die Durchführung dieses Filters sinnvoll erscheint.

Die Fließrichtung wird aus dem DHM abgeleitet. Aus den Höhendaten wird ermittelt, in welche Richtung jede einzelne Zelle entwässert: hin zur benachbarten Rasterzelle mit dem niedrigsten Höhenwert.

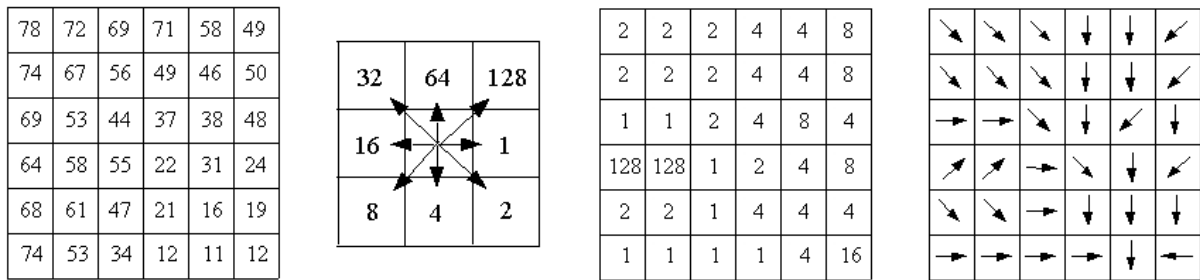


Abbildung 19: Schematische Darstellung zur Berechnung der Fließrichtung (von links nach rechts): Höhenwerte im DHM, Fließrichtungscodierung, Fließrichtungsraster mit den jeweiligen Codes und die graphische Darstellung der Fließrichtung. Quelle: verändert nach NOAA.

Mit Hilfe des Strömungsrichtungsrasters kann die Fließakkumulation berechnet werden. Diese gibt an, wie viele Rasterzellen in eine bestimmte Rasterzelle entwässern. Sie gibt einen ersten Eindruck, in welchen Regionen beziehungsweise Rasterzellen sich Wassermassen akkumulieren können.

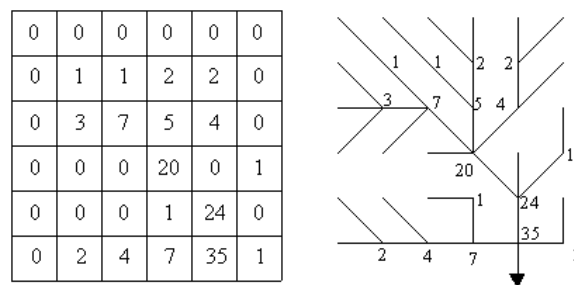


Abbildung 20: Schematische Darstellung zur Berechnung der Fließakkumulation (von links nach rechts): Fließakkumulationsraster mit den jeweiligen Codes und graphische Darstellung des Entwässerungsnetzes. Quelle: verändert nach NOAA.

Die Fließakkumulation zeigt Werte zwischen 0 und 4.840,787. Werden die niedrigen Werte der Fließakkumulation betrachtet, so zeigt sich ein sehr komplexes Fließnetz. Eine solche Komplexität lässt sich anhand des Fluss-Shapefiles für Cilacap nicht bestätigen. Durch einen Vergleich mit dem Datensatz der Flüsse, die vom LIPI gestellt werden, kann durch einen iterativen Prozess ein unterer Schwellenwert von 700 für die Fließakkumulation ermittelt werden, der den realen Bedingungen – repräsentiert durch die Digitalisierung der perennierenden Flussläufe – bestmöglich entspricht (s. Abbildung 21). Die Berechnung erfolgt mit dem *Raster Calculator*.

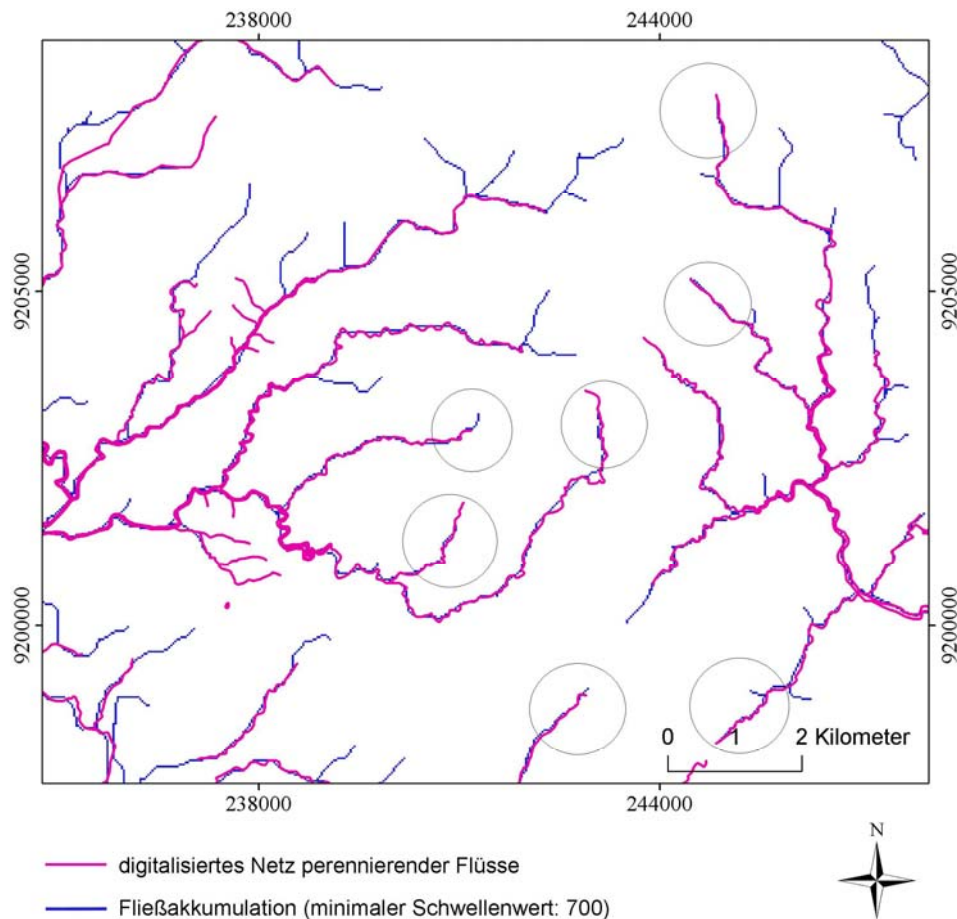


Abbildung 21: Vergleich des digitalisierten Flussnetzes mit der Fließakkumulation zur Auswahl eines Schwellenwertes durch einen iterativen Prozess. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Mit Hilfe der Formeln (1), (1.1) und (1.2) kann der TI ermittelt werden. In einem weiteren Schritt wird zwischen versiegelter Fläche und sonstiger Landbedeckung unterschieden, um den STI zu erhalten. Die versiegelte Fläche begünstigt den oberflächlichen Abfluss und erhöht die Fließakkumulation. Auf Grund der fehlenden  $K_f$ -Werte werden alle sonstigen Landnutzungsformen als homogene Einheit angenommen. Nach der Formel (2) von SEIFERT (2006) erhalten alle nicht versiegelten Flächen den konstanten  $K_{sD}$ -Wert 1. Der Logarithmus von 1 ist 0. Demnach wird der ursprüngliche TI aus der Formel (2) nicht verändert, sondern vollkommen durch die topographischen Eigenschaften des Geländes bestimmt. Für diejenigen Bereiche, für die keine Daten zur Durchlässigkeit oder Tiefe vorliegen (in diesem Fall der versiegelten Fläche entsprechend), wird nach SEIFERT (2006) der  $K_{sD}$ -Wert 0,001 zugeordnet. Je weiter dieser Wert in der Formel (2) gegen 0 geht, desto weiter geht der Wert gegen minus unendlich. Hinsichtlich der Logarithmusfunktion (s. Abbildung 22) in der Formel (2) führt ein negativer Wert durch das doppelte Minus zu einer Addition. Daraus resultiert, dass der TI größer wird – und damit das Potential für Hochwasser.

Werden die Formeln (1) und (1.2) betrachtet, so ergibt sich folgendes Problem: Ist die Hangneigung gleich null, so ist der TI nicht zu berechnen, da die Division mit Null nicht definiert ist. ArcGIS löst diese Rechenbarriere mit dem Ergebniswert ‚NoData‘. Nach der Formel des TI sind Bereiche mit einer Hangneigung gleich null nicht definiert. Der Logik des TI und seiner Anwendung folgend sind ebene Flächen für Hochwasser besonders gefährdet. Die Begründung liegt in der Betrachtung der angegebenen Formeln und der Logarithmusfunktion:

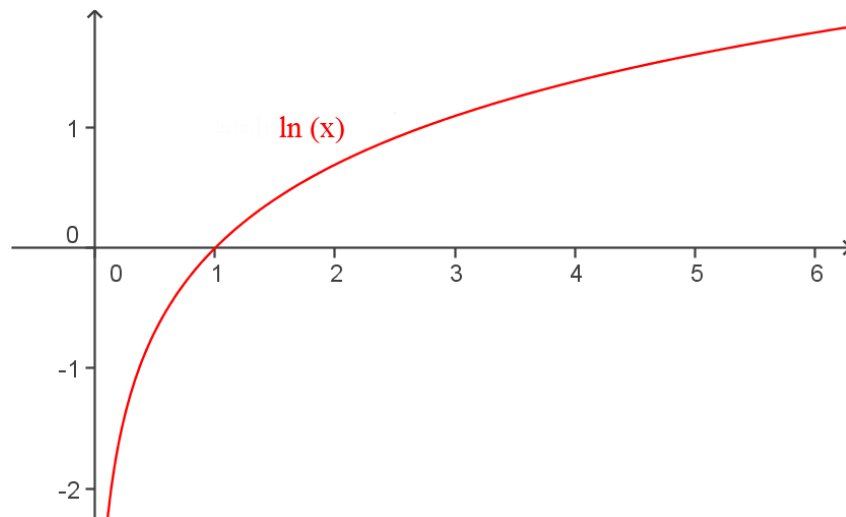


Abbildung 22: Die Logarithmusfunktion. Quelle: verändert nach Exbook.de.

Je kleiner die Hangneigung, desto kleiner wird  $\tan \beta$ . Daraus folgt:

1. Je kleiner  $\tan \beta$ , desto größer wird  $\left(\frac{a}{\tan \beta}\right)$ . Daraus folgt:
2. Je größer  $\left(\frac{a}{\tan \beta}\right)$ , desto größer wird  $\ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right)$ . Daraus folgt:
3. Je größer  $\ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right)$ , desto größer wird der TI.

Daher erhalten die ‚NoData‘-Bereiche nach dem bereits verwendeten Schema mit Hilfe des *Raster Calculator* ein Scoring von 5, um eine vollständige Gefahrenkarte ohne graphische Lücken zu erstellen.

Für den TI gibt es durch den Logarithmus keinen absoluten minimalen und maximalen Wert. Der Wert kann gegen Null gehen, wird jedoch niemals null, der maximale Wert ist abhängig von den Eingangsdaten der Fließakkumulation und Hangneigung. Der Wert des STI kann unendlich groß werden, je nachdem, wie niedrig der KsD-Wert in der Formel (2) ge-

wählt wird. In dieser Analyse wurde der KsD-Wert der versiegelten Fläche nach dem Beispiel von SEIFERT (2006) auf 0,001 gesetzt. Je kleiner dieser Wert gewählt wird, desto niedriger wird der Logarithmus. Der STI kann entsprechend der Formel (2) unendlich groß werden.

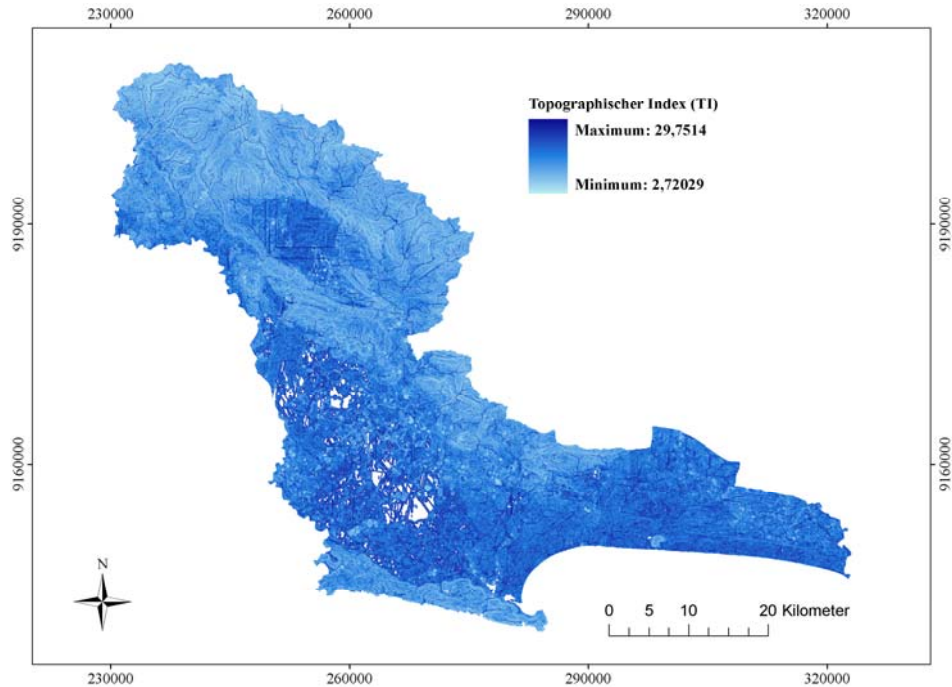


Abbildung 23: Der Topographische Index (TI). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

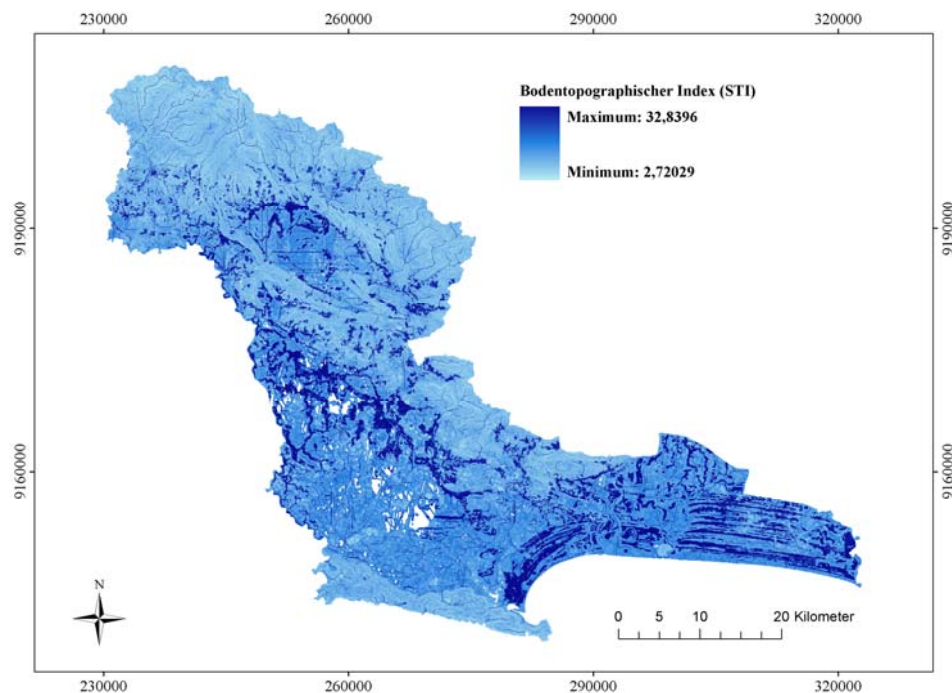


Abbildung 24: Der Bodentopographische Index (STI). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Werte des TI liegen zwischen 2,72 und 29,75. Der STI weist durch die Unterscheidung zwischen versiegelter und sonstiger Fläche einen Index zwischen 2,72 und 32,84 auf. Die Ergebnisse werden gegenübergestellt und auf wesentliche Unterschiede geprüft.

Im Südosten Cilacaps sind küstenparallele Strukturen erkennbar, die einen hohen bodentopographischen Index aufweisen. Im Vergleich mit den Daten der Landnutzung (s. Abbildung 25 (a)) wird deutlich, dass es sich bei diesen Strukturen um versiegelte Flächen handelt, die aus dem bodentopographischen Index auf Grund eines verstärkten Oberflächenabflusses resultieren. Die Abbildung 25 (b) untermauert diese Aussage, da der topographische Index diese Strukturen nicht aufweist und lediglich aus der Hangneigung beziehungsweise der Topographie abgeleitet wird (s. Abbildung 25 (c)). Allerdings lassen sich diese küstenparallelen Strukturen nicht plausibel erklären. Beim visuellen Vergleich des STI mit dem Hillshade (s. Abbildung 25 (d) und (e)) zeigt sich, dass die Bereiche mit einem höheren Index auf erhöhtem Relief gelegen sind. Die Fließakkumulation kann dort, den physikalischen Grundlagen der Hydrologie folgend, nicht ansteigen. Fällt in solchen Bereichen Niederschlag, so wird er dem größten Gefälle folgend abfließen, was in diesem Bereich in alle Richtungen gegeben ist. Da die Umgebung niedriger liegt, müsste der Indexwert auf den Erhöhungen niedrig und in der benachbarten, niedrigeren Umgebung erhöht sein. Daraus lässt sich schließen, dass die Formel (2) schlichtweg zur Erhöhung des STI an gleicher Stelle führt, wenn der Parameter der Bodenversiegelung entsprechend gewählt wird. Allerdings kann dieser Parameter innerhalb dieser Formel nicht der hydrologischen Logik folgen, was zu einem falschen Ergebnis führt. Bodenversiegelung führt zu einem erhöhten Abfluss, jedoch nicht zwangsläufig zu einer erhöhten Fließakkumulation an Ort und Stelle.



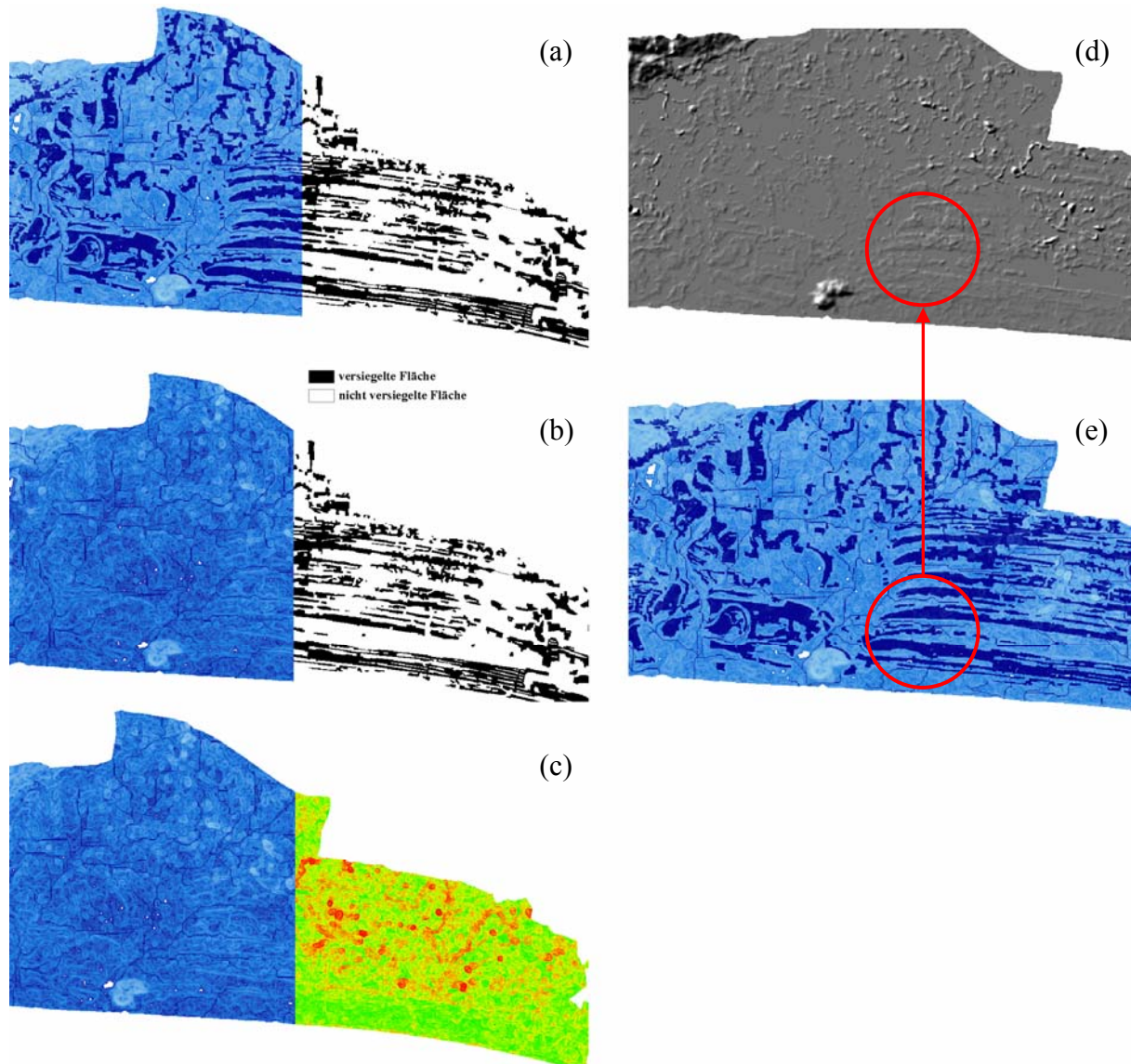


Abbildung 25: Links: Vergleich des STI (a) und TI (b) mit der versiegelten Fläche und der Hangneigung (c) am Beispiel der südöstlichen Küstenlinie Cilacaps. Rechts: Vergleich des Hillshades (d) mit dem STI (e). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Sinngemäß müsste eine Berechnung durchgeführt werden, der zufolge der bodentopographische Index auf konvexen Oberflächen trotz einer Versiegelung niedrig ist, der dadurch bedingte Oberflächenabfluss allerdings zu einer erhöhten Fließakkumulation und damit einem erhöhten Index im Bereich der umliegenden konkaven Oberflächen führt. Innerhalb dieses Ansatzes ist es nicht möglich, die hydrologische Komplexität einer Nachbarschaftsbeziehung zwischen der Hangneigung und, den umliegenden sowie höher gelegenen, versiegelten Flächen herzustellen. Die Sachlage führt zu einer hydrologischen Modellierung, was jedoch durch den Mangel an Daten in dieser Arbeit nicht umgesetzt werden kann.

Hinzu kommt, dass die Hangneigung mit einer räumlichen Auflösung von 30 Metern nicht mit der relativ generalisierten Digitalisierung der Siedlungsgebiete verglichen werden kann. Innerhalb eines Polygons schwankt die Hangneigung erheblich. Dies verhindert eine genaue Korrelation.

Auf Grund dieser Fehler stellt sich die Frage, welches Ergebnis für die Multi-Hazard-Analyse verwendet werden soll. Der topographische Index wird lediglich durch die Topographie abgeleitet und berücksichtigt keinerlei sonstige physikalische Parameter. Der bodentopographische Index unterscheidet weiter zwischen versiegelter sowie unversiegelter Fläche, was für die Bestimmung hydrologischer Bedingungen erheblich ist. Allerdings sind Fehler ersichtlich, die das Ergebnis in diesem Fall stark verfälschen – insbesondere im Küstenbereich. In Anbetracht der Tatsache, dass die Hochwasseranalyse in der Multi-Hazard-Analyse eine beachtliche Gewichtung erhält (s. Kapitel 6.5), würde sich dieser Fehler erheblich auf das Endergebnis auswirken. Daher wird für die Hochwasser-Gefahrenanalyse der vereinfachte topographische Index herangezogen.

Die Werte des TI werden für die Zuweisung eines Scorings in fünf Intervalle (1 bis 5) unterteilt. Doch zunächst stellt sich die Frage, wie sich der TI zu dem Gefahrenpotential verhält. Welcher TI-Index entspricht welchem Überflutungsausmaß und damit Gefahrenpotential? Im Folgenden werden mögliche Ansätze beschrieben, mit denen Intervalle sinnvoll gebildet werden könnten.

Eine Möglichkeit wäre die Validierung mit Hilfe der MANNINGS GLEICHUNG (4) nach HEROLD & MOUTON (2006), die auf den Abflussgleichungen aufbaut und zur Simulation von Überflutungsflächen herangezogen wird.

$$(3) \quad Q = A * V$$

$$Q = \text{Abfluss [m}^3/\text{s]}$$

$$V = \text{Fließgeschwindigkeit [m/s]}$$

$$A = \text{Querschnittsüberschwemmungsfläche [m}^2\text{]}$$

$$(4) \quad V = \frac{R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

$$n = \text{MANNING Rauigkeitskoeffizient}$$

$$R = \text{hydraulischer Radius [m]} = \frac{A}{P}$$

$$P = \text{Feuchtigkeitsgrenze [m]}$$

$$S = \text{Hangneigung des Kanals [m/m]}$$

Daraus folgt

$$(5) \quad Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * P^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

und (6)  $A = (nQ)^{\frac{3}{5}} * P^{\frac{2}{5}} * S^{\frac{3}{10}}$

mit (7)  $P = b + 2h$  (HEROLD & MOUTON 2006, 8)

Der Parameter  $S$  beschreibt die Hangneigung am ausgewählten Messpunkt. Dieser Wert kann dem DHM entnommen werden. Die Berechnung der Formel ergibt letztendlich die vertikale Querschnittsüberflutungsfläche. Die Berechnung der Überschwemmungsfläche erfolgt nach der Formel (6), unter Einbezug der Formel (7).

Da keine genauen Informationen über den ausgewählten Flusslauf vorhanden sind, könnte der MANNING'sche Rauigkeitskoeffizient  $n = 0,05$  von HEROLD & MOUTON (2006) übernommen werden. Er entspricht einem natürlich gewundenen Flusslauf mit Unkraut und Teichen (HEROLD & MOUTON 2006, 8).

Hinsichtlich der Auflösung des DHM müsste der ausgewählte Fluss eine Breite von mehr als 30 Metern aufweisen. Der Abfluss  $Q$  müsste ermittelt werden. MEIGH et al. (1997) haben in einer Studie durchschnittliche Abflusswerte für verschiedene Hochwasser in diversen Regionen der Erde ermittelt. Darunter fallen auch Werte für Java für den durchschnittlichen jährlichen Abfluss  $Q_1$ , ein 20-jähriges Hochwasser  $Q_{20}$ , ein 100-jähriges Hochwasser  $Q_{100}$  sowie ein 500-jähriges Hochwasser  $Q_{500}$  (vgl. MEIGH et al. 1997, 234). Mit diesen Werten könnten die unterschiedlichen Querschnittsüberschwemmungsflächen berechnet werden.

$$(8) \quad A = b * h$$

$A$  = Überschwemmungsfläche [ $\text{m}^2$ ]

$b$  = Kanalbreite [m]

$h$  = Flusshöhe/-tiefe [m]

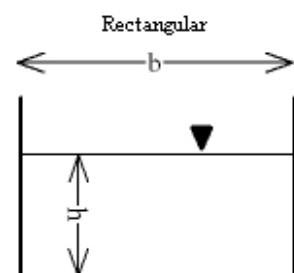


Abbildung 26: Vereinfachte, rechteckige Darstellung eines Flussbettes. Quelle: Engineering Toolbox.

Für Cilacap liegen keine Daten zu den Flussbetten vor. Zur Vereinfachung könnte ein rechteckiges Flussbett angenommen werden. Die Kanalbreite  $b$  ist aus den vorhandenen Daten nicht zu ermitteln. Sie könnte aus hochauflösten Daten ermittelt werden. Die Flusstiefe  $h$  könnte aus Pegelständen abgeleitet werden.

In einem weiteren Schritt müsste die berechnete Querschnittsfläche auf das DHM „angepasst“ werden. Durch einen iterativen Prozess könnte in Erfahrung gebracht werden, wie die berechnete Fläche auf das DHM an der entsprechenden Stelle passt. Hierfür müssten die Parameter  $b$  und  $h$  in der Formel schrittweise verändert werden. Eine Übereinstimmung wäre gefunden, wenn die Eckpunkte der Breite der vertikalen Überschwemmungsfläche das DHM berühren (HEROLD & MOUTON 2006, 8f.).

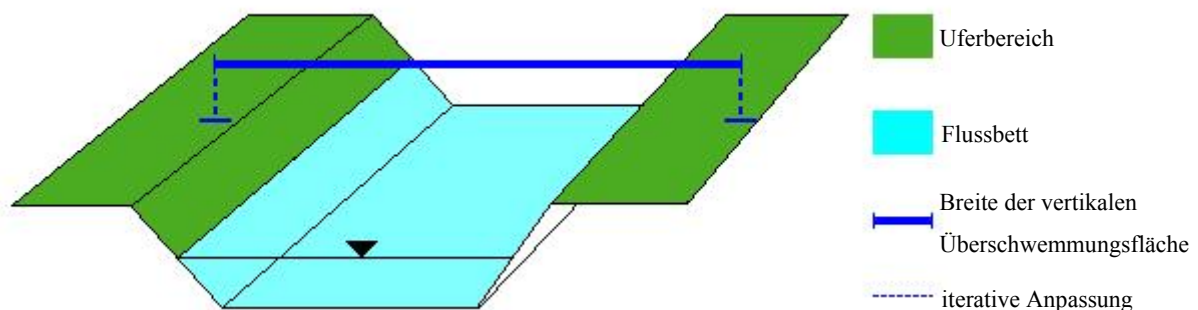


Abbildung 27: Schema des iterativen Prozesses: Anpassung der berechneten Querschnittsüberschwemmungsfläche an das DHM. Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Berechnung erfolgt an einem bestimmten Punkt des Flusslaufs. Da sich die Parameter im Flussverlauf ändern, müsste die Berechnung an verschiedenen Stellen flussauf- beziehungsweise -flussabwärts erfolgen. Die Werte zwischen den berechneten Flächen könnten anschließend interpoliert werden. Das Ergebnis würde die Überflutungsfläche für ein bestimmtes Hochwasser entlang dem ausgewählten Fluss bilden. Würde diese interpolierte Fläche in ein Raster konvertiert werden, könnte sie mit dem topographischen Index verglichen werden. Welchem TI entspricht welche der Überflutungsflächen von  $Q_1$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{100}$ ,  $Q_{500}$ ? Entspricht ein jährliches Hochwasser einem eher niedrigen STI und das 500-jährige Hochwasser einem sehr hohen TI? Auf diesem Weg ließen sich die Gefahrenintervalle – basierend auf dem TI – für das Scoring abschätzen und gleichzeitig begründen.

Diese Methode ist zeit- und datenintensiv. Auf Grund der Tatsache, dass sowohl die hydrologischen Daten als auch Daten zum Gewässernetz für das Untersuchungsgebiet nicht verfügbar sind und alle Parameter hergeleitet werden müssten, lassen sich die Anwendbarkeit des Ergebnisses und der Nutzen in diesem Fall in Frage stellen. Das Ergebnis des topographi-

schen Indexes wäre zwar validiert, allerdings auf einer zweifelhaften Datenbasis, die ihrerseits kritisiert werden kann.

Eine weitere Methode wäre der Vergleich der Indexwerte mit Überflutungskarten, wie es UHRICH (2002) beschreibt (UHRICH 2002, 65f.). Durch einen rasterbasierten Vergleich könnten Hochwasserereignisse unterschiedlicher Ausmaße mit den Indexwerten verglichen und das jeweilige Gefahrenpotential, basierend auf der Magnitude des Hochwasserereignisses, abgeleitet werden. Für Cilacap beziehungsweise Zentraljava sind keine historischen Überflutungskarten verfügbar, deren Auflösung eine solche Validierung zulassen würde. Die Abbildung 28 stellt für wenige Jahre das Ausmaß diverser Hochwasserereignisse dar. Da diese Daten lediglich als Karte und nicht als Datensatz verfügbar und die räumliche und zeitliche Auflösung sehr gering sind, werden sie für einen visuellen Vergleich herangezogen. Die Karte wurde georeferenziert und in ArcGIS eingebunden.

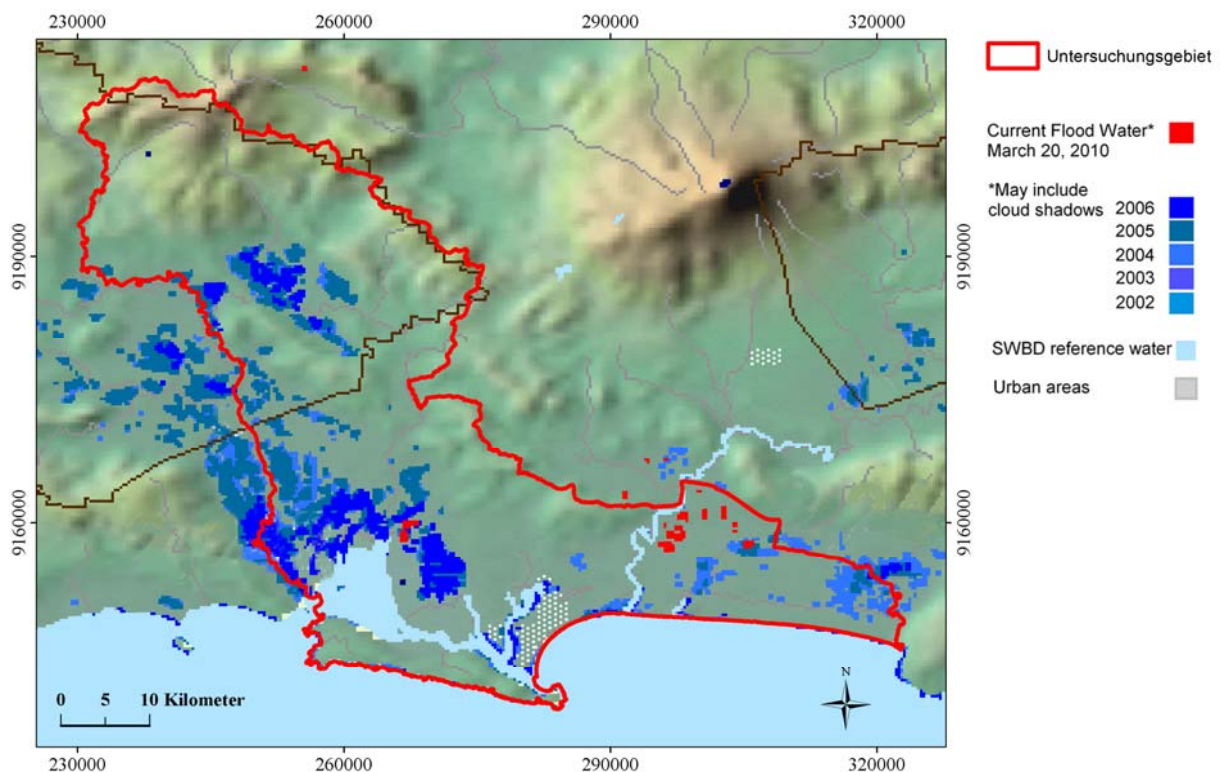


Abbildung 28: Hochwasserereignisse in Zentraljava/Cilacap. Quelle: verändert nach Dartmouth Flood Observatory.

Die Bildung der Gefährdungsintervalle erfolgt auf einer eigenen Einschätzung. Das Ergebnis des topographischen Indexes muss zunächst interpretiert werden, um plausible Gefahrenintervalle bilden zu können. Zur Interpretation des hydrologischen Fließverhaltens wird die Topographie eingehender betrachtet. In ArcGIS wurde aus dem DEM ein *Hillshade* berech-

net. Die Schummerung ermöglicht eine visuelle Deutung des Reliefs, wobei beachtet werden muss, dass die Auflösung von circa 30 Metern nur sehr eingeschränkt das Relief im Mikrobereich darstellen kann, obgleich dies für eine genaue Interpretation der Hydrologie nötig wäre.

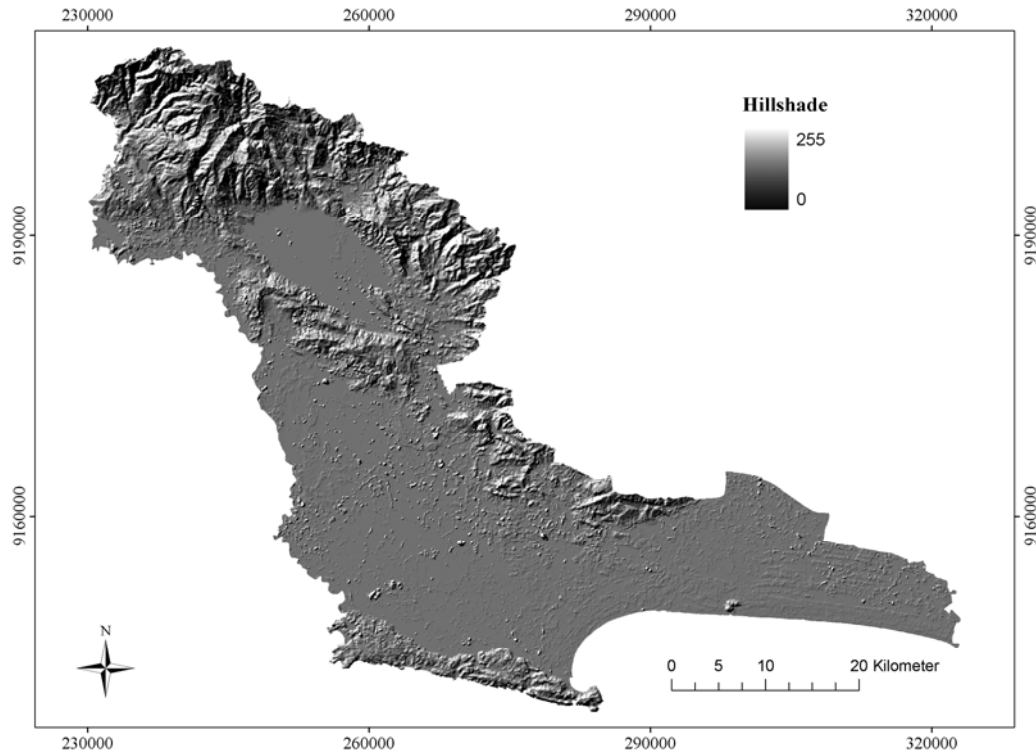


Abbildung 29: Hillshade des Untersuchungsgebietes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Wird der Norden Cilacaps betrachtet, so fällt das Becken südlich des Gebirges auf. Es ist anzunehmen, dass die Flüsse südlich der Wasserscheide – die zugleich die Grenze der Regentschaft Cilacap bildet – in diese Beckenlage entwässern. Ein erhöhtes Hochwasserpotential wird daher vermutet. Zudem wird ein erhöhtes Risiko für alle Niederungen und offene Flächen mit flachem Relief angenommen, in denen sich das Wasser aus Zuflüssen und Niederschlägen sammelt, bis es letztendlich über den *Serayu River* im Südosten und über die Lagune *Segara Anakan* im Südwesten Cilacaps in den Indischen Ozean fließt. Trotz der geringen Anzahl an dokumentierten Ereignissen (vgl. Abbildung 28) werden die Vermutungen bestätigt. Sowohl in der Beckenlage als auch im flachen Bereich des zentralen und südwestlichen Cilacaps sind mehrere Hochwasserereignisse in einem kurzen Zeitrahmen dokumentiert. Das höhere Relief im Norden und Nordosten sowie die Halbinsel an der Küste werden von hohen Wasserpegeln verschont.



Durch einen iterativen Prozess werden die Werte des topographischen Indexes in fünf Intervalle eingeordnet, die das Gefahrenpotential für die Region bestmöglich wiedergeben (s. Tabelle 13 in Kapitel 7.2). Die Orientierung erfolgt insbesondere an den zuvor dargestellten Verhältnissen. Größere Niederungen und Beckenlagen erhalten ein verhältnismäßig hohes Gefahrenpotential, steileres Relief ein eher niedriges. Das Ergebnis wird in Kapitel 7.2 dargestellt und beschrieben. In Kapitel 8.2 folgt eine Interpretation und Diskussion der Ergebnisse sowie der Methodik.

### **6.3 Die Methodik bei Erdbeben**

Im folgenden Kapitel werden die Problemstellung sowie die Gefahrenkarte für Erdbeben vorgestellt und erläutert.

#### **6.3.1 Problemstellung**

Erdbeben gehören zu den verheerendsten Naturgefahren der Erde. Das meist hohe Schadensausmaß resultiert vor allem aus dem unvorhersehbaren Auftreten eines Erdbebens. Hinzu kommt eine häufig mangelhafte Bauweise, die den Erschütterungen nicht standhalten kann (VERMA & RATHORE 2002, 1f.).

Das Ausmaß von Erdbebenschäden wird durch die Interpretation von Satellitenbildern bestimmt, indem Bilder vor (pre-event) und nach (post-event) einem Ereignis verglichen werden. Doch auch hochaufgelöste Bilder unter einem Meter erlauben meist keine Detektion von Schäden, die unter oder gleich dem zweiten Grad nach der Mercalli-Skala entsprechen. Ab dem fünften Stärkegrad ist die Erkennung von Schäden relativ einfach, darunter mit großen Unsicherheiten behaftet. Gebäude, die vollkommen zerstört sind, lassen sich einfacher erkennen als leicht beschädigte Gebäude, insbesondere auf einer vollkommen vertikalen Aufnahme. Die automatische Klassifikation von Schäden sei weniger von der Auflösung, sondern vielmehr von der Farbverteilung einer Aufnahme im roten, grünen und blauen Spektralbereich abhängig (YAMAZAKI & MATSUOKA 2006, 3, 8).

Gewöhnlich stellen Erdbebenkarten Wiederholungswahrscheinlichkeiten in Form unterschiedlicher Zonen dar, die auf der relativen Bodenbeschleunigung innerhalb eines langjährigen – in der Regel 50 Jahre – Bezugsraumes beruhen (SITHARAM et al. 2007, 290; VERMA & RATHORE 2002, 4; GIARDINI & BASHAM 1993, 11). MOLAS & YAMAZAKI (1994) betrachten in deren Studie auf Grund der Datengrundlage lediglich zehn Jahre und verweisen auf die großen Unsicherheiten, die sich aus solch kurzen Betrachtungszeiträumen ergeben. Die Regel sei ein Zeitraum von hundert Jahren (MOLAS & YAMAZAKI 1994, 33s, 39s). SITHARAM et al. (2007) beispielsweise verwenden eine Erdbebenkarte, die unterschiedliche Quellen beinhaltet und auf historischen Ereignissen beruht. Die zusammengetragenen Daten werden letztendlich überlagert. Prinzipiell seien alle Faktoren zu berücksichtigen, die Erdbeben auslösen bezie-



hungsweise begünstigen (SITHARAM et al. 2007, 290ff.). Hierzu zählen auch geologische Störungen, an denen die Wahrscheinlichkeit starker und häufiger Erdbeben höher ist (VERMA & RATHORE 2002, 4; WISNER et al. 2006, 277). MARZOCCHI et al. (2009) berücksichtigen in ihrer Studie unter anderem historische Daten zu Frequenzen und Magnituden, Erdbebenzonen, unterschiedliche Herdtiefen sowie geologische Verwerfungen, die in einem komplexen Gewichtungsverfahren aggregiert werden (MARZOCCHI et al. 2009, 12ff.). Im Folgenden wird beispielhaft ein kurzer Überblick zur Methodik der Erdbebengefareneinschätzung gegeben.

Nach MOLAS & YAMAZAKI (1994) gibt es zwei Ansätze zur Erdbebengefareneinschätzung. Der erste basiert lediglich auf der Auswertung historischer Ereignisse, während der zweite Wahrscheinlichkeitsprinzipien umfasst. Der Wahrscheinlichkeitsansatz beinhaltet geologische Strukturen und Faktoren, die signifikanten Einfluss auf die Seismik haben. Mit Hilfe historischer Aufzeichnungen und geologischer Untersuchungen werden maximal mögliche Magnituden ermittelt (MOLAS & YAMAZAKI 1994, 33s). PETERSEN et al. (2004) betonen auch die Bedeutung kleiner, für den Menschen nicht spürbarer Erdbeben für die Rekonstruktion der Frequenz-Magnituden-Verteilung vergangener Erdbeben und damit auch für die Einschätzung künftiger Ereignisse (PETERSEN et al. 2004, 144).

Die Gefahreneinschätzung ergibt sich aus der Beziehung zwischen der durchschnittlichen jährlichen Ereignisrate  $\nu$  und der maximalen Bodenbewegung  $y$ , die gleich oder größer als ein vorgegebener Wert ist, der sich aus folgender Formel ergibt:

$$(1) \quad \log \nu = a + b \log y \qquad a, b : \text{Regressionskonstanten}$$

Für jedes Erdbeben wird die maximale Bodenbewegung mit Hilfe des Schwächungsgesetzes ermittelt. Das Schwächungs- oder Abstandsgesetz beschreibt den Betrag der Abnahme einer physikalischen Größe in Abhängigkeit von der Entfernung zur Quelle. In diesem Fall beschreibt die physikalische Größe das Ausmaß der Bodenbewegung und die Quelle das Hypozentrum eines Erdbebens. Die Konstanten  $a$  und  $b$  ergeben sich aus einer Regressionsanalyse (MOLAS & YAMAZAKI 1994, 34s). Dabei handelt es sich um ein statistisches Analyseverfahren zur Ermittlung von linearen Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen. Somit können Zusammenhänge aufgedeckt und Prognosen erstellt werden (ALBERS & SKIERA 1999, 205). Falls das Auftreten von Erdbeben, dessen Ma-

ximalwert einen gegebenen Wert  $y$  überschreitet, als Poisson-Prozess<sup>2</sup> vermutet wird, entspricht die Wahrscheinlichkeit von  $k$  Ereignissen in  $t$  Jahren der Formel:

$$(2) \quad P(k, t) = \frac{(vt)^k e^{-vt}}{k!}$$

Die Wahrscheinlichkeit des Nicht-Auftretens  $Q$  in  $t$  Jahren wird durch die folgende Formel angegeben:

$$(3) \quad P(0, t) = Q = e^{-vt}$$

Aus den Gleichungen (1) und (3) lässt sich der Wert für die maximale Bodenbewegung bei einem gegebenen Wert  $Q$  und einem Zeitraum  $t$  herleiten:

$$(4) \quad \log y = \frac{\log(-\ln Q / t) - a}{b}$$

Von der Annahme des Poisson-Prozesses ausgehend, ergibt sich die Relation  $T$  zwischen Überschreitungswahrscheinlichkeit und Wiederholungsperiode der maximalen Bodenbewegung:

$$(5) \quad T = \frac{1}{v} = \frac{-t}{\ln Q}$$

Beispielsweise ist eine zehnprozentige Wahrscheinlichkeit einer maximalen Bodenbewegung,  $Y \geq y$ , in  $t = 50$  Jahren äquivalent zu einer Wiederholungsperiode von  $Y \geq y$ , in  $t = 475$  Jahren (MOLAS & YAMAZAKI 1994, 34s).

Die Ergebnisse sind stark von der Regressionsanalyse und daher von den verfügbaren Daten abhängig. Dies betrifft insbesondere die Tiefe des Erdbebenherdes, dem Hypozentrum. Ob die Entfernung zum Hypo- oder zum Epizentrum verwendet würde, führe zu keinen bedeutenden Unterschieden in der Analyse. Allerdings ergäbe die Betrachtung der Entfernung zum Epizentrum meist bessere Ergebnisse. Diese Entfernung bildet schließlich den entscheidenden Parameter der Regressionsanalyse (MOLAS & YAMAZAKI 1994, 34s).

---

<sup>2</sup> Bei dem Poisson-Prozess handelt es sich um einen stochastischen Prozess zur mathematischen Beschreibung von zeitlich geordneten, zufälligen Vorgängen. Er ermittelt die Häufigkeit bestimmter Zufallsereignisse in einem bestimmten Zeitintervall.

GIARDINI & BASHAM (1993) erläutern das Procedere des *Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)*. Es werden Erdbebenkataloge herangezogen, die Informationen zu vergangenen Erdbeben beinhalten. Allerdings seien weder die Inhalte noch die Erdbebencharakteristika standardisiert. Die Beschreibung zukünftiger Ereignisse basiert auf der Kombination von dem Wissen über historische Beben und über geologische Störungen, an denen die Erdbeben auftreten. Schwierig sei allerdings die genaue Zuordnung der jeweiligen Störung als Auslöser des Ereignisses. Daher werden seismische Messungen meist einheitlich auf ein bestimmtes Gebiet übertragen. Weiter werden Wiederholungsraten und Ausmaße beachtet (GIARDINI & BASHAM 1993, 11).

### **6.3.2 Durchführung**

Das LIPI liefert für den Datensatz der Erdbeben keine Metadaten, weshalb die Quelle des Shapefiles nicht nachvollzogen werden kann. Es handelt sich um Zonen unterschiedlicher Bodenbeschleunigung. Daher ist anzunehmen, dass es sich um eine Karte handelt, die nach dem Prinzip der relativen Bodenbeschleunigung innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens erstellt worden ist – wie es beispielsweise SITHARAM et al. (2007), VERMA & RATHORE (2002) und GIARDINI & BASHAM (1993) beschreiben. Daten zu geologischen Störungen in Cilacap werden vom LIPI zur Verfügung gestellt. Angesichts der Erdbebenkarte ist allerdings zu vermuten, dass diese Störungen nicht bei der Erstellung berücksichtigt wurden. Gleiche Vermutung gilt auch für die geologischen und pedologischen Bedingungen, die ihrerseits Einfluss auf das Ausmaß der Bodenbewegungen haben. Der vorhandene Datensatz liegt im Bereich der Makro- oder Mesoskala. Idealerweise wäre für die Analyse eine Karte im mikroskaligen Bereich notwendig, um eine höhere Auflösung der Gefahrenbereiche zu erhalten. Solche Einschränkungen ergeben sich aus einer geringen Datengrundlage (MOLAS & YAMAZAKI 1994, 34s; VERMA & RATHORE 2002, 4).

Die verfügbaren Daten werden in Abbildung 30 dargestellt. Fünf Gefährdungsbereiche erhalten ein Scoring zwischen 1 und 5. Cilacap fällt lediglich in zwei Gefahrenbereiche. Sie weisen eine durchschnittliche Bodenbeschleunigung von 2-3 und 3-4 m/s<sup>2</sup> beziehungsweise ein Scoring von 2 und 3 auf.

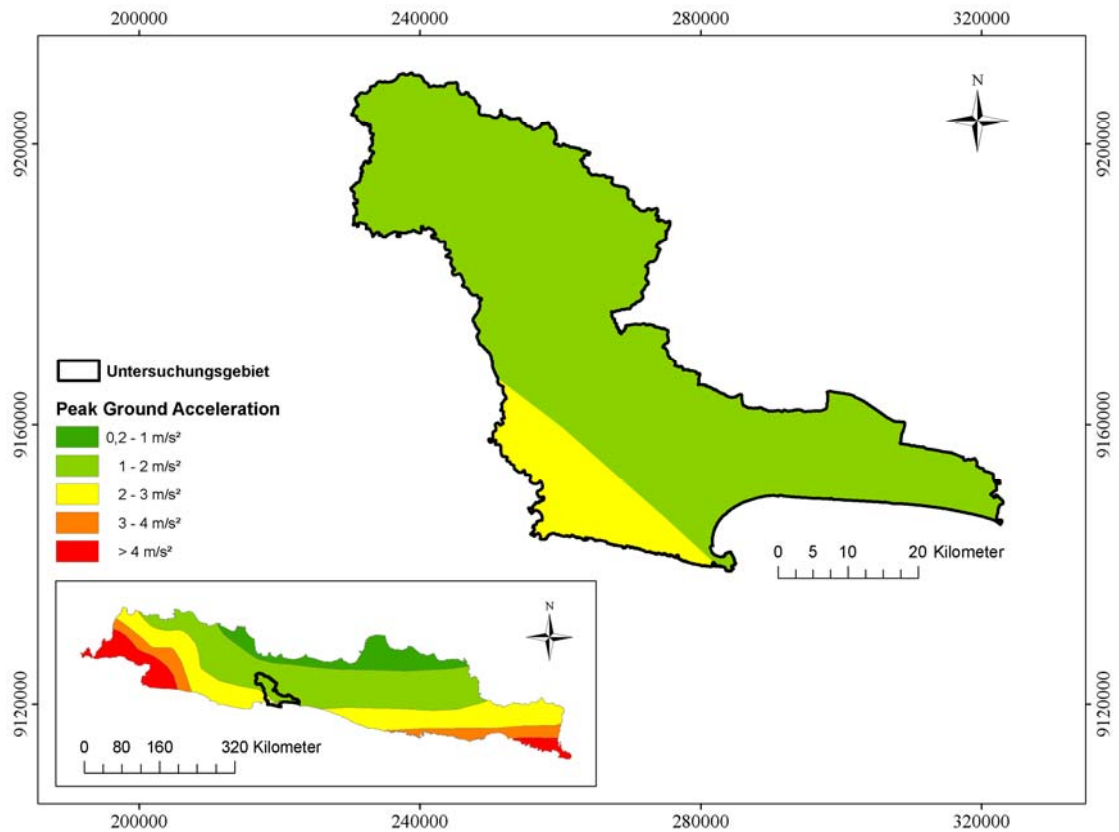


Abbildung 30: Die durchschnittliche, erdbebenbedingte Bodenbeschleunigung in Cilacap. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 7: Die durchschnittliche, erdbebenbedingte Bodenbeschleunigung auf Java. Quelle: Eigener Entwurf.

Bodenbeschleunigung in g	m/s <sup>2</sup>	Magnitude auf der Richterskala	Scoring
0,02039 - 0,10194	0,2 - 1	4 - 5,5	1
0,10194 - 0,20387	1 - 2	5,5 - 5,75	2
0,20387 - 0,30581	2 - 3	5,75 - 6,5	3
0,30581 - 0,40775	3 - 4	6,5 - 6,75	4
> 0,40775	> 4	> 6,75	5

## 6.4 Die Methodik bei Tsunamis

Die numerische Gefahrenanalyse für Tsunamis wurde für Cilacap bereits im Rahmen des GITEWS-Projektes seitens DLR und Partnern erstellt. Die Gefahrenanalyse beruht auf einer Tsunamimodellierung, die vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) durchgeführt und für eine aufbauende Gefahren- und Risikoanalyse an das DLR weitergegeben wurde. Die Simulation deckt unter anderem auch die Küste Cilacaps ab. Berücksichtigt werden der Einfluss der südwestlich gelegenen Halbinsel, die Tiefe der Schifffahrtskanäle im Hafen Cilacaps, die Siedlungsstrukturen, der durchschnittliche Höhenanstieg ins Landesinnere sowie Dünen und Mulden (GAYER et al. 2010, 1680f.). Auf die Modellierung wird im Folgenden nicht weiter eingegangen. Für die vorliegende Arbeit ist die darauf aufbauende Gefahrenanalyse von Bedeutung.

Die Gefahrenzonen wurden nach potentiellen Wellenhöhen beziehungsweise *run up heights* und nach Wahrscheinlichkeiten erstellt. Für diese Arbeit werden die Wahrscheinlichkeiten herangezogen. Das Procedere ist dokumentiert und wird im Folgenden dargestellt.

### 6.4.1 Problemstellung

Tsunamigefahrenkarten können sich je nach Zielsetzung unterscheiden. Allgemein werden Bereiche dargestellt, die in einer Region unmittelbar von Tsunamis betroffen sind. Andere Karten stellen die wahrscheinlichsten Überflutungsbereiche dar oder beschreiben betroffene Gebiete, die aus einer Anzahl hypothetischer Ereignisse resultieren. Letztere werden als Multi-Szenario-Ansätze bezeichnet, da sie potentielle Überflutungsbereiche verschiedener Tsunamis in einer Karte aggregieren (DLR/GTZ 2009, 4).

Es ist unabdingbar, dass Tsunamis hinsichtlich ihrer Wahrscheinlichkeiten betrachtet werden. Tsunamis gehören zu den Naturereignissen, die eine vergleichsweise niedrige Frequenz, aber hohe Magnitude aufweisen. Indonesien wird durchschnittlich alle zwei Jahre von einem Tsunami getroffen (DLR/GTZ 2009, 5; HARJADI 2008, 3). An manchen Küstenregionen variiert das Intervall zwischen 30 bis 50 oder sogar 200 bis 300 Jahren. Sie werden in der Regel durch submarine Erdbeben ausgelöst. Die schwächeren Tsunamis sind bedeutend häufiger im

Gegensatz zu den sogenannten ‚*worst case*‘-Ereignissen (DLR/GTZ 2009, 5). Diese Tatsache stellt eine Herausforderung für die Gefahrenanalyse dar.

Für die Hazard-Analyse sind sowohl das Relief der Küste als auch die Unterwassertopographie von wesentlicher Bedeutung. Hinzu kommen Hindernisse auf dem Land, die Reibungswiderstände darstellen. Sie bestimmen Geschwindigkeit und Ausmaß eines Tsunamis und damit die Reichweite der Welle (SCHEFFERS 2008, 174).

#### 6.4.2 Durchführung

Die in dieser Arbeit verwendeten Ergebnisse stellen eine Kombination aus Wahrscheinlichkeitsanalyse und Multi-Szenario-Analyse dar. Letztere basiert auf einer großen Anzahl potentieller Tsunamis, die durch Erdbeben unterschiedlicher Magnituden und Ursprünge entlang dem Sundagraben verursacht werden. Die Simulation des AWI deckt die gesamte Pazifikküste von Sumatra, Java und Bali ab, so dass solche Daten auch für die Küste Cilacaps verfügbar sind. Die Analyse beruht auf einem DTM mit einer Auflösung von 50 Metern. Eine höhere Auflösung von etwa fünf Metern wäre lediglich für das Stadtgebiet Cilacaps verfügbar und deckt nicht die gesamte Küste ab.

Nicht berücksichtigt sind Tsunamis, die aus dem sogenannten *Back Arc Fault*, aus submarinen Massenbewegungen und aus vulkanischer Aktivität resultieren. Diese Einschränkung erfolgt auf Grund fehlender Daten bezüglich deren Wahrscheinlichkeiten, Ereignissen und möglichen Einflüssen dieser Tsunamis (DLR/GTZ 2009, 11, 4). Nach HAMZAH et al. (2000) sind Erdbeben die bedeutendste Ursache für Tsunamis.

Der Ansatz basiert auf einem *Ereignis-Baum-Verfahren* (DLR/GTZ 2009, 11), das die unterschiedlichen Warnstufen nach dem *Indonesia Tsunami Early Warning System* (InaTEWS), wie in Tabelle 8 beschrieben, beinhaltet.

Tabelle 8: InaTEWS Warnstufen. Quelle: DLR/GTZ 2009, 11.

Tsunami Kategorie	Warnstufe	Wellenhöhen (WH) Reichweite [m]
-	-	$0,0 = WH < 0,1$
schwacher Tsunami	Gering	$0,1 = WH < 0,5$
Tsunami	Mittel	$0,5 = WH < 3,0$
schwerer Tsunami	Hoch	$WH \geq 3,0$

In einem ersten Schritt werden diejenigen Tsunamiszenarien ausgewählt, die für das Untersuchungsgebiet relevant sind. Weiter werden die ausgewählten Szenarien in zwei Kategorien von Warnstufen zusammengefasst. Unterschieden wird zwischen Tsunamis, die an der Küste eine Wellenhöhe über beziehungsweise unter drei Metern aufweisen. Daraus ergibt sich eine Gefahrenkarte, die die maximalen Überschwemmungsbereiche für Wellenhöhen über drei Metern darstellt. Die Bereiche unter drei Metern Wellenhöhe enthalten geschätzte räumliche Wahrscheinlichkeiten von Erdbeben mit spezifischen Magnituden entlang dem Sundagraben. MARDIATNO et al. (2008) führen eine ähnliche Analyse speziell für Cilacap durch, allerdings mit bedeutend niedrigeren Wellenhöhen. Zudem liegt deren Schwerpunkt auf dem Worst-Case-Szenario, mit einem Erdbeben der Magnitude 8,5 (MARDIATNO et al. 2008, 3). Der Sinn dieser Analyse lässt sich in Frage stellen, da solche Ereignisse vergleichsweise selten sind und Tsunamis mit hoher Frequenz und niedrigerer Magnitude bedeutend häufiger eintreten (DLR/GTZ 2009, 12). Somit kumuliert sich auch deren Schadenpotential. Auf die Problematik verweisen auch ZOSEDER et al. (2009) (ZOSEDER et al. 2009, 1).

Schwache Erdbeben weisen niedrige Magnituden, aber höhere Frequenzen auf, weshalb sie eine höhere Gewichtung erhalten als schwere Erdbeben mit niedriger Frequenz. Darüber hinaus weist der Sundagraben auf Grund seiner Geologie eine variierende seismische Aktivität auf, weshalb bestimmte Punkte der Subduktionszone eine erhöhte Eintrittswahrscheinlichkeit für schwere Erdbeben aufweisen. Demzufolge sei eine Überflutung durch ein Erdbeben hoher Magnitude in einem Gebiet mit geringer Seismizität weniger wahrscheinlich als ein Tsunami niedrigerer Magnitude in einem Erdbeben-, Hot Spot'. Dies verlangt in einem weiteren Schritt eine Wahrscheinlichkeitsanalyse (DLR/GTZ 2009, 11, 11f.).

Die Wahrscheinlichkeitsanalyse erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die Region des Sundagrabens anhand der seismischen Aktivität in drei Zonen unterteilt. Die Wahrscheinlichkeit basiert auf einer jährlichen Wiederholungsrate von Erdbeben diverser Magnituden, die aus historischen Daten hergeleitet wird. Um diese Analyse zu optimieren, werden deterministische Modelle berücksichtigt, die die Eintrittswahrscheinlichkeiten eines Erdbebens gewichten und diese Wahrscheinlichkeit mit 0,1 (nicht identifizierbare beziehungsweise inaktive Hot Spots) bis 1 (Hot Spots mit hoher Wahrscheinlichkeit von Erdbeben hoher Magnituden) beziffern. In diesem numerischen Modell wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Erdbeben noch dazu einen signifikanten Tsunami auslöst, berücksichtigt.

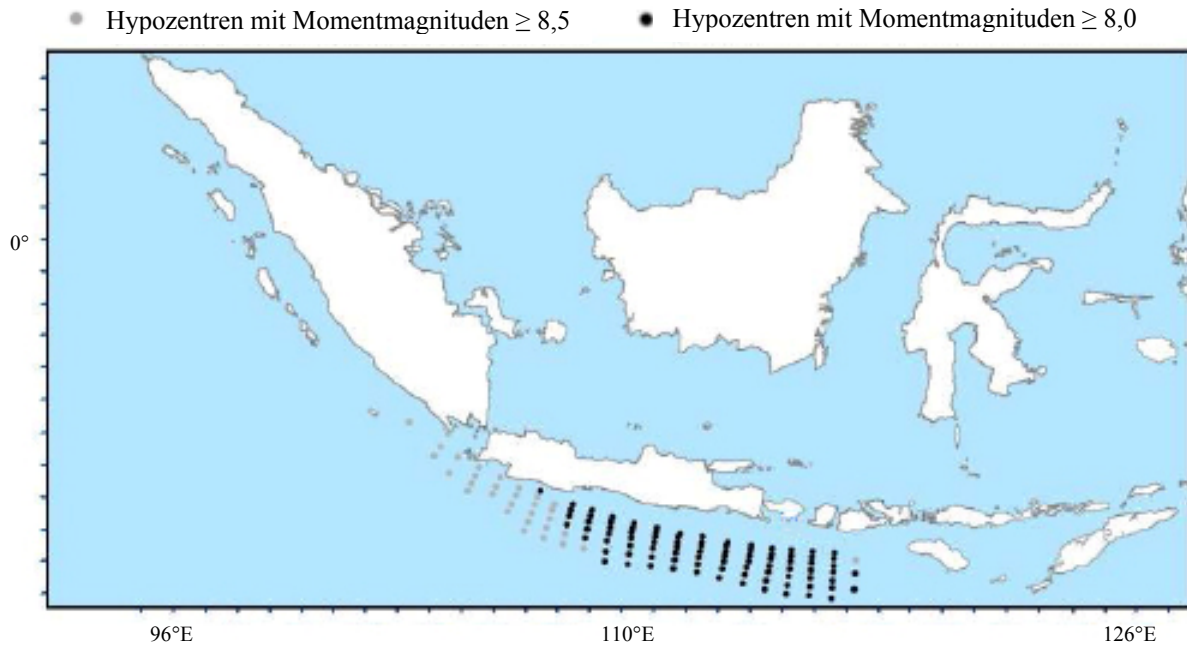


Abbildung 31: Beispiele für verschiedene Erdbebenherde entlang des Sundagrabens. Quelle: verändert nach DLR/GTZ 2009, 16.

Ein weiterer Schritt ist die Bestimmung der räumlich differenzierten Überflutungswahrscheinlichkeiten der Küste. Es ist möglich, dass sich die Überflutungsbereiche verschiedener Tsunamiszenarien überschneiden, so dass einige Areale häufiger überflutet werden als andere – also eine höhere Frequenz erfahren. Dies gilt insbesondere für die unmittelbare Küste. Die Überflutungswahrscheinlichkeit wird durch Punkte in einem Grid dargestellt, die etwa 100 Meter voneinander entfernt liegen. Für jeden dieser Punkte wird die Anzahl an Überschwemmungen pro Jahr, verursacht durch verschiedene Szenarien, ermittelt. Die Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Addition der Treffer, dividiert durch die Gesamtanzahl an Szenarien innerhalb eines Jahres. Um diese Punkte flächenhaft als Gefahrenkarte darzustellen, werden die einzelnen Punkte interpoliert. Die Wahrscheinlichkeits- und Warnstufenkarten werden nun kombiniert, indem die Wahrscheinlichkeitskarte über die Warnstufenkarte gelegt wird (DLR/GTZ 2009, 13ff., WEGSCHEIDER et al. 2010, 4f.)

Die Analyse basiert auf der Aggregation von simulierten Ereignissen für jeden Gridpunkt, um daraus die Eintrittswahrscheinlichkeit ableiten zu können. Allerdings wären die Wahrscheinlichkeiten der Ursachen unberücksichtigt, die zum Auslösen eines Tsunamis führen. Daher wurde eine numerische Analyse historischer Daten und geophysikalischer Untersuchungen durchgeführt, um die Signifikanz der Gefahrenanalyse zu erhöhen. Demzufolge bezieht die Analyse Wahrscheinlichkeiten zum Eintritt von Erdbeben verschiedenster Magnituden und Hypozentren, Wahrscheinlichkeiten zur Wellenhöhe an der Küste sowie Eintritts-



wahrscheinlichkeiten eines Tsunamis für jeden Punkt an Land mit ein (ZOSSEDER et al. 2009, 1).

## **6.5 Die Methodik der Multi-Hazard-Analyse**

Welches der behandelten Naturereignisse birgt nun die höchste Gefahr für Cilacap? Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist schwierig, zumal sie auf unterschiedlichen Beobachtungszeiträumen beruhen. Hinzu kommt die Problematik der wechselseitigen Einflüsse zwischen den Naturereignissen (MARZOCCHI et al. 2009, 53). Im Folgenden werden die Problematik sowie die Durchführung der Multi-Hazard-Analyse erläutert.

### **6.5.1 Problemstellung**

Wie alle anderen Methoden auch liegt eine wesentliche Einschränkung in der Datenverfügbarkeit, -genauigkeit und -qualität. Die zeitliche und räumliche Auflösung begrenzt die Effizienz von Multi-Hazard-Analysen. Dennoch verwenden DI MAURO et al. (2006) einen Ansatz, bei dem sich die Gewichtung an der Eintrittswahrscheinlichkeit beziehungsweise Frequenz der Ereignisse orientiert. Da es sich bei deren Studie um eine Risikoanalyse handelt, werden potentielle Schäden miteinbezogen, um die Intensität zu ermitteln (DI MAURO et al. 2006, 5, 8). Die Gefahrenanalyse hingegen betrachtet diesen Faktor nicht.

Problematisch ist die stetige Veränderung der Faktoren und Zeitreihen, auf denen die Analyse aufbaut. Jede Methode sollte über eine dynamische Komponente verfügen, durch die räumlich relevante Trends durchgehend erfasst und aktualisiert werden können. Darüber hinaus weichen die Datengrundlagen verschiedener Gefahren voneinander ab. Für manche Ereignisse sind unter Umständen detaillierte Zeitreihen vorhanden, während andere erhebliche Lücken aufweisen. Dies schränkt den Vergleich von Intensitäten erheblich ein (GREIVING et al. 2006, 17).

Diverse Organisationen führen Listen über Naturereignisse. Um nur wenige zu nennen: das USGS, das Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) beziehungsweise die International Disaster Database (EM-DAT), die National Disaster Management Agency (BNPB), die NOAA, das Earthquake Engineering Research Institute (EERI) sowie Autoren wie HAMZAH et al. (2000) oder RASTOGI & JAISWAL (2006), die Listen über Tsunamis im Indischen Ozean erstellt haben. Ein Vergleich der Daten ist jedoch schwierig bis unmöglich, zumal sich die jeweiligen Datenbanken aus Aufzeichnungen anderer Quellen zusammen-

setzen, beispielsweise aus denen der USGS und der NOAA. Es gibt keine Garantien für die Vollständigkeit oder Korrektheit der Zeitreihen, zudem sind die Zeitreihen vollkommen unterschiedlich. Einige reichen nur wenige Jahrzehnte zurück, andere bis ins 17. Jahrhundert. Weiter sind Daten teilweise nur überregional (in diesem Fall für ganz Indonesien (EM-DAT) oder für Java (EERI; BNPB)) verfügbar und erlauben keine räumliche Differenzierung. Andere (HAMZAH et al. 2000) sind nach tektonischen Großeinheiten differenziert. Auch in diesem Fall ergeben sich Probleme, da beispielsweise der Tsunami vom 26. Dezember 2004 auch Cilacap (nach HAMZAH et al. (2000) *East Sunda* (HAMZAH et al. 2000, 28)) erreichte, jedoch in einer anderen geologischen Einheit (*Sumatra/West Sunda*) zeitlich aufgelistet wird. Eine Anfrage bei CRED nach räumlich höher aufgelösten Daten blieb erfolglos. Darüber hinaus sind kaum Angaben zu den Intensitäten beziehungsweise Magnituden vorhanden. Solche Informationen wären für die Gewichtung der einzelnen Naturgefahren von erheblichem Vorteil. Der Unterschied ist beträchtlich, ob eine bestimmte Frequenz von Ereignissen durchschnittlich hohe oder niedrige Magnituden aufweist. Bei einer Datenlücke sind beide Tatbestände potentiell möglich. In diesem Fall muss die Magnitude eines jeden Ereignisses als Konstante betrachtet werden.

MARZOCCHI et al. (2009) führen in ihrer Risikoanalyse ein Ranking durch. Sie betrachten einen Zeitraum von lediglich einem Jahr und orientieren sich an den humanen Schäden. Die jährlichen Wahrscheinlichkeiten der betrachteten Naturgefahren werden letztendlich aufsummiert (MARZOCCHI et al. 2009, 60f.).

Diese Analyse folgt dem Prinzip der *Aggregated Hazard Map* nach GREIVING et al. (2006), wie in Kapitel 3.2 bereits erläutert. Die Hazard-Maps der vorangegangenen Analysen werden aggregiert, wobei die Schwierigkeit in der Gewichtung liegt. Die Delphi-Methode ist auf Grund der begrenzten Zeit im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar. Die Gewichtung der einzelnen Naturgefahren erfolgt nach eigener Einschätzung und wird im Folgenden beschrieben.

### **6.5.2 Durchführung**

Die Frage, welche der verfügbaren Datenbanken zur Durchführung einer Gewichtung ausreichend zuverlässig ist, kann nicht beantwortet werden. Es stellt sich vielmehr die Frage, welche für den Zweck dieser Arbeit am sinnvollsten ist. Die Datenbank vom BNPB führt Rutschungs- und Hochwasserereignisse für Cilacap. Die Eintrittsorte für Ereignisse wie Erdbeben

und Tsunamis können nach den Sundainseln gefiltert werden. Angesichts der Tatsache, dass sowohl Erdbeben als auch Tsunamis einen im Vergleich zur Regentschaft Cilacap überregionalen Einflussbereich aufweisen können, erscheint der Fehler bei der Betrachtung aller aufgezeichneten Ereignisse Javas – auch hinsichtlich der alternativen Datenlage – als akzeptabel. Das wesentliche Problem liegt in der zum Teil kurzen Zeitreihe. Tsunamis und Rutschungen sind erst seit 1998 dokumentiert, Erdbeben seit 1924 und Hochwasser seit 1916. Allerdings liegt bei der Hochwasserzeitreihe eine Lücke zwischen 1973 und 2002 vor. Zwischen 1916 und 2002 sind lediglich drei Ereignisse gelistet (s. Tabelle 9). Einer mündlichen Information des LIPI zufolge gehören Hochwasser zu den Naturereignissen, die in Cilacap beinahe jährlich auftreten. Daher lässt sich die Vollständigkeit der Daten anzweifeln. Es ist allerdings nicht ersichtlich, nach welchen Kriterien ein Hochwasser als ‚Hochwasser‘ dokumentiert wird.

Für die folgende Gewichtung werden die Daten des BNPB herangezogen und wie folgt behandelt: Die Aufzeichnungen der Erdbebenereignisse werden als vollständig angenommen. Nach dem USGS gibt es keine Anzeichen, dass sich die Frequenz der Erdbeben in den letzten Jahrzehnten signifikant verändert hätte. Eine Zunahme der Ereignisse resultiere in erster Linie auf Grund eines expandierenden, seismographischen Netzes (USGS). Diese Behauptung ließe sich durch die homogene zeitliche Verteilung der Ereignisse bedingt bestätigen. Die hohe vulkanische Aktivität in Indonesien lässt auf eine durchgehende, geologische Aktivität des Sundagrabens schließen. Es ist anzunehmen, dass sich die Häufigkeit der Erdbeben und damit der Tsunamis nicht signifikant verändert hat. Die meteorologischen Daten zu Cilacap (Quelle: LIPI) weisen ebenfalls keine signifikanten Veränderungen auf. Sofern davon ausgegangen wird, dass die Niederschläge den bedeutendsten Auslöser für gravitative Massenbewegungen und Hochwasser darstellen, ließe sich die These aufstellen, dass sich die daraus resultierende Anzahl an Ereignissen in den letzten Jahrzehnten ebenfalls nicht signifikant verändert hat. Stützend auf diese Behauptung werden die kurzen Zeitreihen (s. Tabelle 10) auf den Zeitraum zwischen 1924 und 2009 – orientierend an dem Datensatz der Erdbeben – per Extrapolation „vervollständigt“ (s. Tabelle 11). Beim Hochwasser wird beispielsweise angenommen, dass innerhalb von acht Jahren 18 Ereignisse eintreten, im Fall der Tsunamis sechs in zwölf Jahren und bei Rutschungen 18 in zwölf Jahren. Diese Methode ist, wie sämtliche Datenbanken, skeptisch zu betrachten – ermöglicht allerdings einen zeitlichen Vergleich aller relevanten Naturereignisse und somit eine Gewichtung (s. Tabelle 11).

Tabelle 9: Dokumentierte Anzahl der unterschiedlichen Naturereignisse, dargestellt in unterschiedlichen Zeitreihen zur Veranschaulichung der Datenlücken. Quelle: Eigener Entwurf. Daten: BNPB.

	Anzahl Ereignisse			
Zeitraum	Rutschung	Hochwasser	Erdbeben	Tsunami
1998 - 2009	18			6 <sup>3</sup>
2002 - 2009		18		
1916 - 2009		21		
1924 - 2009			25	
1990 - 2009	18	18	10	6

Tabelle 10: Referenzzeiträume der jeweiligen Naturereignisse, die zur Extrapolation der Datenlücken verwendet werden. Quelle: Eigener Entwurf.

	Rutschung	Hochwasser	Erdbeben	Tsunami
Referenzzeitraum	1998 - 2009	2002 - 2009	1924 - 2009	1998 - 2009

Tabelle 11: Extrapolierte Anzahl an Naturereignissen zwischen 1924 und 2009 und die daraus berechnete Gewichtung. Quelle: Eigener Entwurf.

Anzahl Ereignisse zwischen 1924 und 2009			
Rutschung	Hochwasser	Erdbeben	Tsunami
129	193,5	25	41
Gewichtung			
0,332	0,498	0,064	0,106

Die Gewichtung der einzelnen Analyseergebnisse erfolgt nach der Formel:

$$\text{Score}_{\text{Ges}} = (0,332 * \text{Score}_{\text{Rutschung}} + 0,498 * \text{Score}_{\text{Hochwasser}} + 0,064 * \text{Score}_{\text{Erdbeben}} + 0,106 * \text{Score}_{\text{Tsunami}})$$

Das Ergebnis wird in Kapitel 7.5 dargestellt und in Kapitel 8.5 diskutiert.

<sup>3</sup> Die Datenbank dokumentiert im Jahr 2004 (2006) 21 (9) Tsunamis, die allerdings alle auf dasselbe Datum (26.12.2004 (17.7.2006)) fallen. Der Tsunami wurde an 21 Orten entlang der indonesischen Küste registriert und wird in diesem Fall nur als ein Ereignis gezählt. Alle Datenreihen werden hinsichtlich der Zeitdaten in dieser Art und Weise untersucht, sofern die zeitliche Auflösung eine solche Differenzierung zulässt.

## 7 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der vorangegangenen Analysen graphisch dargestellt und beschrieben. Im Anschluss folgt in Kapitel 8 eine Diskussion und kritische Betrachtung, sowohl der Ergebnisse als auch der Methoden.

### 7.1 Rutschungen

Das Ergebnis bildet eine Hazard-Map mit den Kategorien *keine Gefährdung*, *geringe Gefährdung*, *mittlere Gefährdung* und *hohe Gefährdung* (verändert nach HADMOKO et al. 2008, 10) – basierend auf den Scorings zwischen 0 und 5.

Nach MERZ (2006) handelt es sich dabei um ein semi-quantitatives Verfahren, bei dem Eintrittswahrscheinlichkeiten beziehungsweise Folgen subjektiv eingeschätzt werden. Die Anfälligkeit wird mit *sehr gering*, *gering*, *mittel* und *hoch* beschrieben (MERZ 2006, 32), wobei in dieser Arbeit zwecks der Übersichtlichkeit nur die letzten drei Anfälligkeitsstufen verwendet werden. Die folgenden Intervalle basieren auf den maximalen und minimalen Scorings (die Gefahrenbereiche beginnen ab einem Scoring von 1, weshalb für die Klassenintervalle der Minimalwert 1 und nicht 0 herangezogen wird) und folgender Formel:

$$\text{Klassenintervall} = \frac{\text{maximaler Scoringwert} - \text{minimaler Scoringwert}}{\text{Anzahl der Gefahrenintervalle}} = \frac{4,5 - 1}{3} = 1,16$$

Tabelle 12: Gefahrenintervalle für gravitative Massenbewegungen, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen. Quelle: Eigener Entwurf.

Gefährdung	Gefahrenintervall
Keine Gefährdung	< 1
Gering	1 - 2,16
Mittel	2,16 - 3,33
Hoch	3,33 - 5 (4,5)

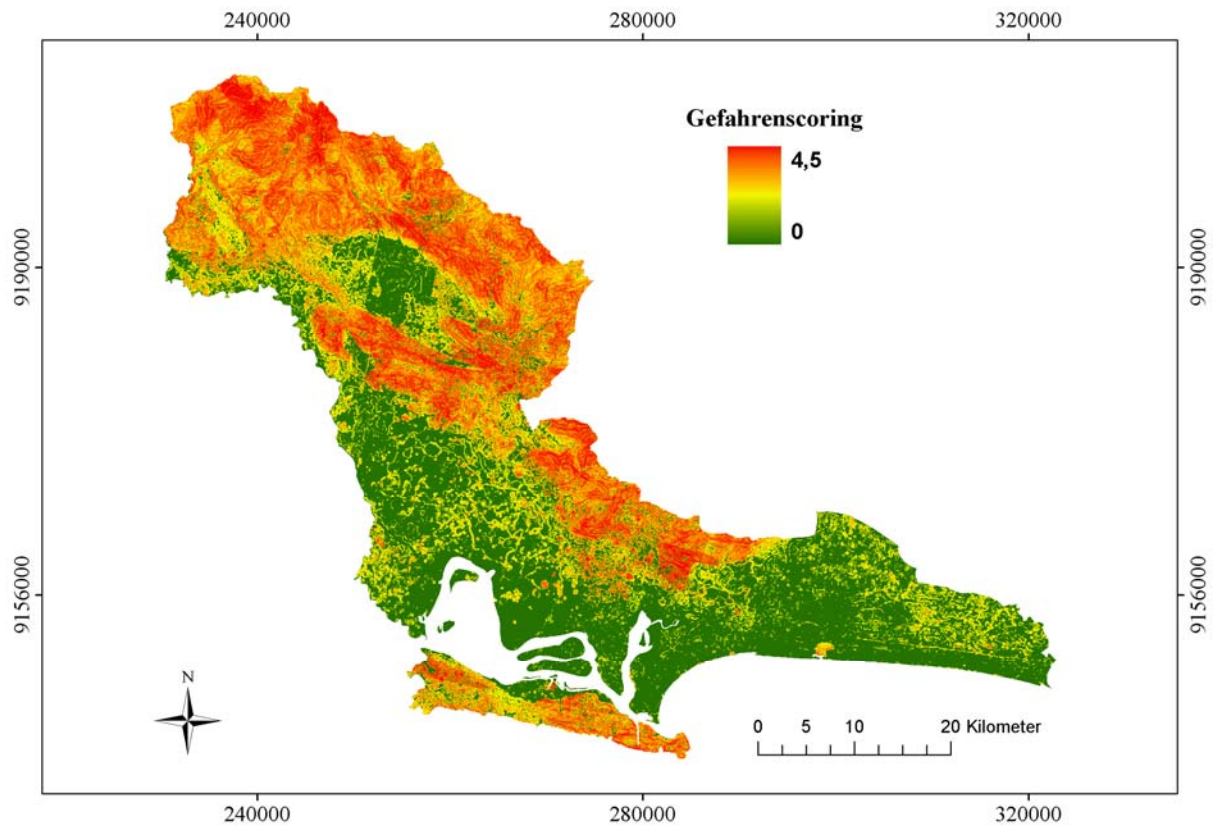


Abbildung 32: Die Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen (Darstellung: Stretched, Histogramm-ausgleich). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

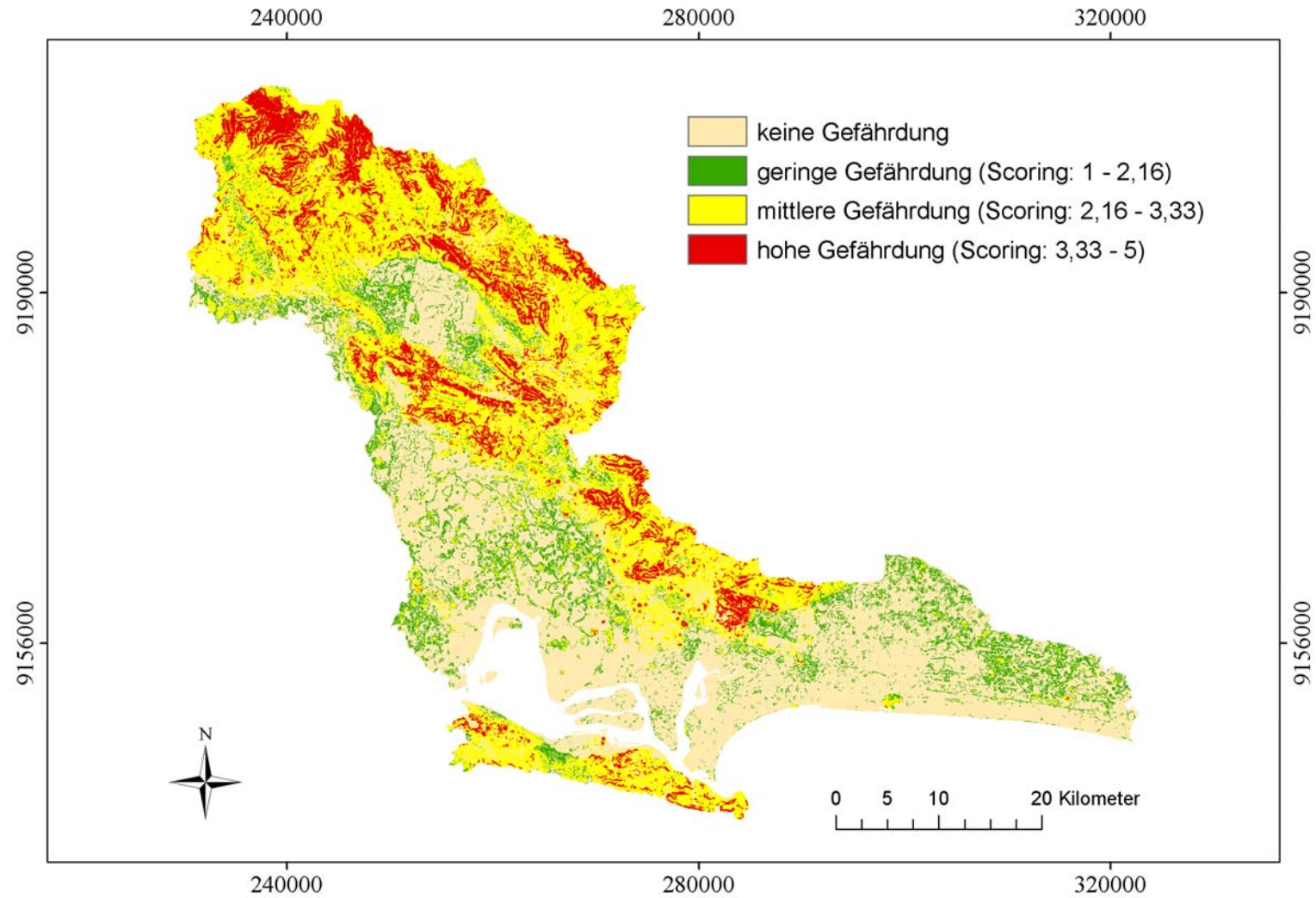


Abbildung 33: Gefahrenpotential durch Hangrutschungen als Ergebnis des Gewichtungs- und Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.



Die Abbildung 33 stellt vier Gefährdungszonen dar. Entsprechend dem Scoring-Ansatz und den Klassenintervallen lassen sich ungefährdete, gering, mittel und hoch gefährdete Gebiete für gravitative Massenbewegungen ausweisen. Eine niedrige Gefährdung liegt in Teilen des im nordwestlich gelegenen Beckens sowie in den eher ebenen Bereichen in Zentralcilacap vor. Darüber hinaus werden das Stadtgebiet, das städtische Umland und die Küstenlinie als nicht gefährdet eingestuft. Ebenso weist partiell der Norden der Halbinsel *Nusakambangan Island* keine Gefährdung auf. Der prozentuale Anteil der nicht gefährdeten Fläche liegt in Cilacap bei 42,8 Prozent.

Eine geringe Gefährdung ist teilweise in der Beckenlage sowie im Randbereich des stärkeren Reliefs vorhanden. Zudem sind in den ebenen Bereichen Cilacaps eine Vielzahl isolierter Flächen mit geringer Gefährdung auffallend. Die Gebiete geringer Gefährdung nehmen 10,9 Prozent der Gesamtfläche Cilacaps ein.

Mit einem Flächenanteil von 35,4 Prozent bildet die mittlere Gefährdungsstufe den Übergangsbereich zwischen der Zone geringer und hoher Gefährdung, insbesondere in den Bereichen stärkeren Reliefs im Norden Cilacaps. Betroffen sind die Gebiete um die nördliche Beckenlage sowie der sich in südöstlicher Richtung erstreckende Höhenzug. Auch die Halbinsel im Süden weist überwiegend eine mittlere Gefährdung für Rutschungen auf.

Gebiete mit hoher Gefährdung finden sich mit ebenfalls 10,9 Prozent der Fläche ausschließlich in den höchsten Lagen des Reliefs. Die größten zusammenhängenden Flächen liegen im Norden, umgeben das Becken von Norden, Osten und Süden und verlaufen entlang dem südöstlichen Höhenzug. Auch die Halbinsel weist kleinräumige Zonen potentiell hoher Rutschungsgefahr auf. Die Niederungen und ebenen Flächen Cilacaps zeigen weitgehend keine Flächen mittlerer oder hoher Gefährdung.

## 7.2 Hochwasser

Die Intervalle für den topographischen Index (s. Tabelle 13) wurden iterativ ermittelt, wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben. Die Abbildung 34 stellt den klassifizierten topographischen Index dar, Abbildung 35 das entsprechende Scoring und damit die Gefahrenstufen. Die Abbildungen dienen zur genaueren Dokumentation und Interpretation der Analyse.

*Tabelle 13: Intervalle des topographischen Indexes und Zuweisung des Scorings, basierend auf der Standardabweichung. Quelle: Eigener Entwurf.*

TI-Intervalle (iterative Anpassung)	Scoring
2,7 - 5,0	1
5,0 - 6,5	2
6,5 - 7,5	3
7,5 - 13,0	4
13,0 – 29,8	5
NoData <sup>4</sup>	5

Die Gebirgszüge und Bereiche erhöhten Reliefs weisen die niedrigsten Werte und dementsprechend ein niedriges Scoring zwischen 1 und 2 auf. Ein mittleres Scoring von 3 bis 4 findet sich insbesondere im nördlichen Becken sowie in den ebenen Bereichen Cilacaps. Das Scoring von 5 ist nur in verhältnismäßig kleinen Bereichen in Zentralcilacap zu finden.

---

<sup>4</sup> Wie in Kapitel 6.2.2 erläutert, erhalten die ‚NoData‘-Bereiche ein Scoring von 5, um eine vollständige Gefahrenkarte ohne graphische Lücken zu erstellen.

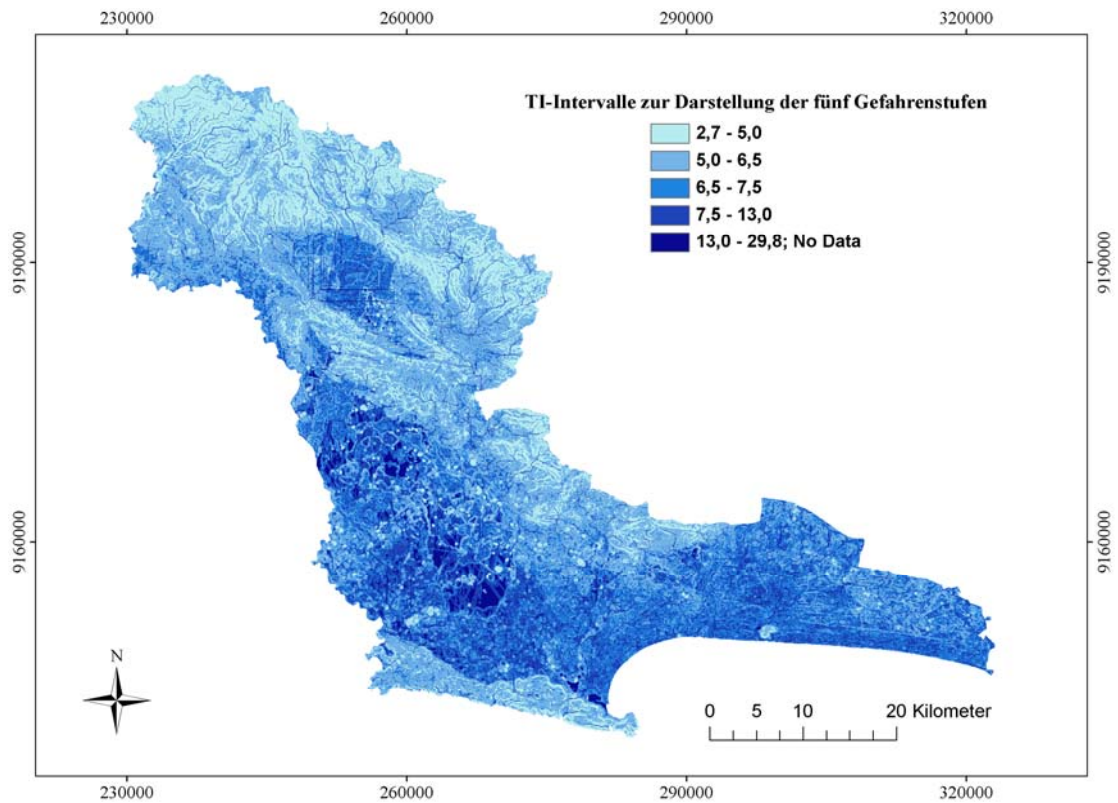


Abbildung 34: TI-Intervalle zur Darstellung der fünf Gefahrenstufen für Hochwasser, basierend auf einem iterativen Prozess. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

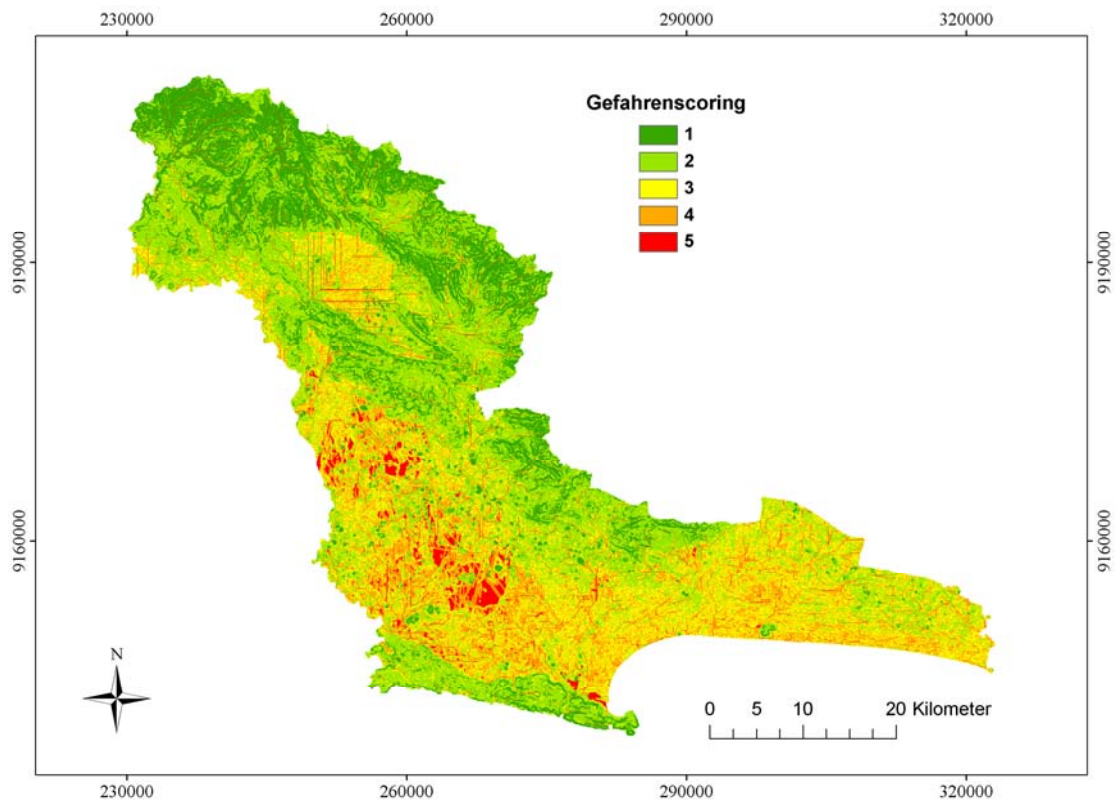


Abbildung 35: Die fünf Gefahrenintervalle des topographischen Indexes. Projektion in WGS 1983 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Die potentielle Hochwassergefahr für Cilacap wird durch eine Hazard-Map (s. Abbildung 36) dargestellt, welche die Gefährdungsstufen *gering*, *mittel* und *hoch* aufweist. Die Intervalle basieren auf den maximalen und minimalen Scoringwerten und folgender Formel:

$$\text{Klassenintervall} = \frac{\text{maximaler Scoringwert} - \text{minimaler Scoringwert}}{\text{Anzahl der Gefahrenintervalle}} = \frac{5 - 1}{3} = 1,33$$

*Tabelle 14: Gefahrenintervalle für Hochwasser, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen.*

*Quelle: Eigener Entwurf.*

<b>Gefährdung</b>	<b>Gefahrenintervall</b>
Gering	1 - 2,33
Mittel	2,33 - 3,66
Hoch	3,66 - 5

Die Regentschaft Cilacap weist mit einem Flächenanteil von 56,9 Prozent eine verhältnismäßig geringe Gefährdung für Hochwasser auf. Gebiete mit einer geringen Hochwassergefahr sind in allen Bereichen stärkeren Reliefs zu finden, die nordwestliche Gebirgsregion, rund um die Beckenlage sowie der in südöstlicher Richtung verlaufende Höhenzug. Hinzu kommt die gesamte Halbinsel an der Küste Cilacaps.

Die Verortung der Bereiche einer mittleren Gefährdung erscheint schwierig. Sie liegen, wie die Zonen hoher Gefährdung, in der nördlichen Beckenlage, den Niederungen im Südwesten sowie im Südosten Cilacaps, insbesondere entlang der Küstenlinie. Die Bereiche geringer und hoher Gefährdung sind kaum voneinander zu trennen und weisen mit Flächenanteilen von 23,3 und 19,8 Prozent keine signifikanten Unterschiede auf. Unabhängig von der Topographie sind alle Flussläufe mit einer hohen Gefährdung ausgewiesen.

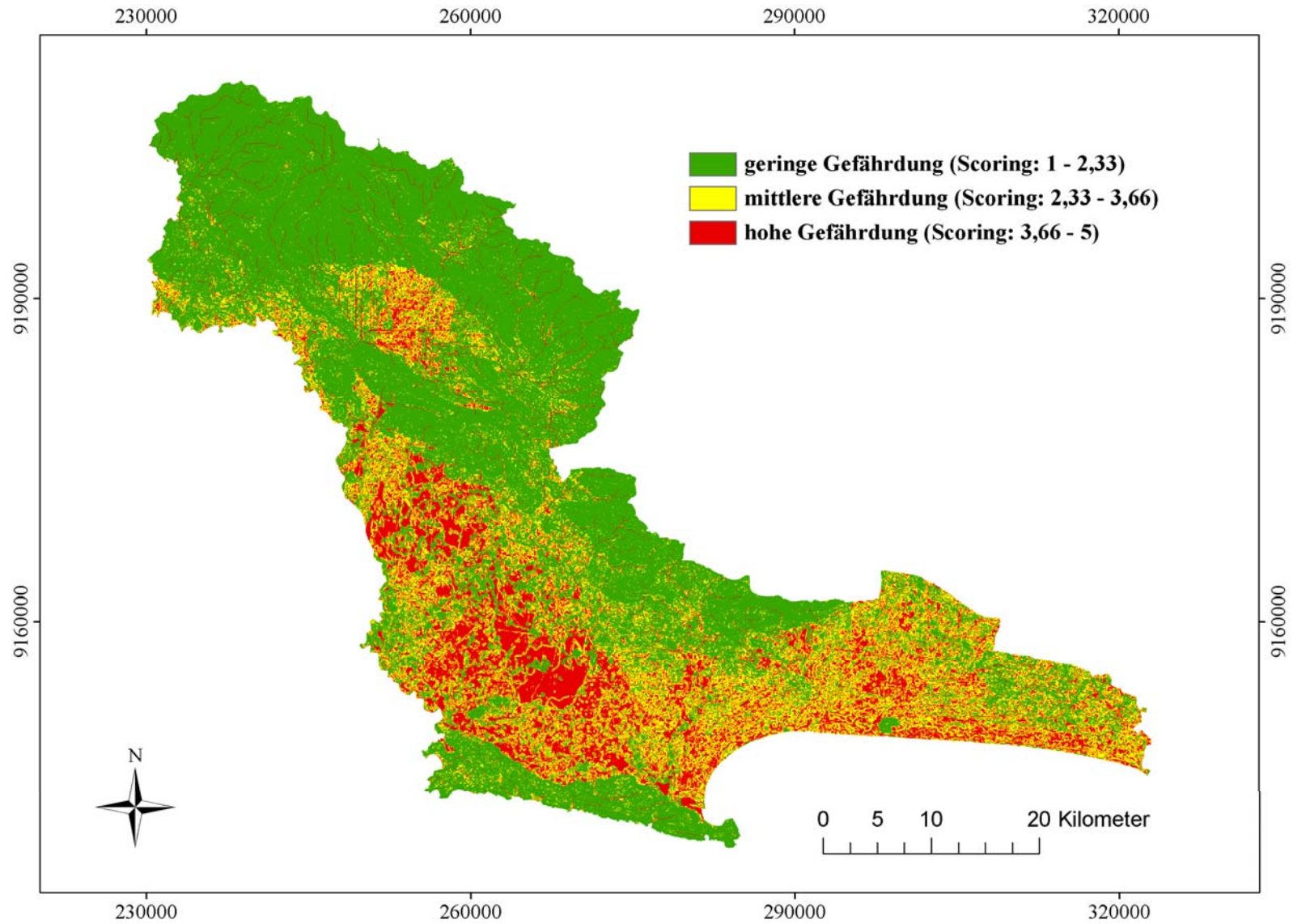


Abbildung 36: Gefahrenpotential durch Hochwasser als Ergebnis des Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

### 7.3 Erdbeben

Das Shapefile der durchschnittlichen Bodenbeschleunigung aus Kapitel 6.3.2 wurde, ebenfalls basierend auf den Scoringwerten, in ein Raster konvertiert. Um die Einheitlichkeit zu gewährleisten, wird die Hazard-Map erneut mit Hilfe der Klassenintervalle erstellt, wie bereits in den Kapiteln 7.1 und 7.2 beschrieben:

$$\text{Klassenintervall} = \frac{\text{maximaler Scoringwert} - \text{minimaler Scoringwert}}{\text{Anzahl der Gefahrenintervalle}} = \frac{5-1}{3} = 1,33$$

*Tabelle 15: Gefahrenintervalle für die durchschnittliche Bodenbeschleunigung, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen. Quelle: Eigener Entwurf.*

Gefährdung	Gefahrenintervall
Gering	1 - 2,33
Mittel	2,33 - 3,66
Hoch	3,66 - 5

Auf Grund der geringen Datenlage liegt das Ergebnis (s. Abbildung 37) im Makrobereich und ist stark generalisiert. Somit sind keine regionalen Aussagen zur Erdbebengefährdung möglich. Cilacap weist in Relation zur Insel Java eine geringe bis mittlere Erdbebengefährdung auf. Das Gebiet geringer Gefährdung nimmt mit einem Flächenanteil von 87,7 Prozent den Großteil Cilacaps ein. Es wird durch die südöstliche Spitze der Halbinsel und der westlichen Grenze Zentralcilacaps begrenzt. Lediglich der Südwesten Cilacaps weist mit 12,3 Prozent eine mittlere Gefährdung auf.

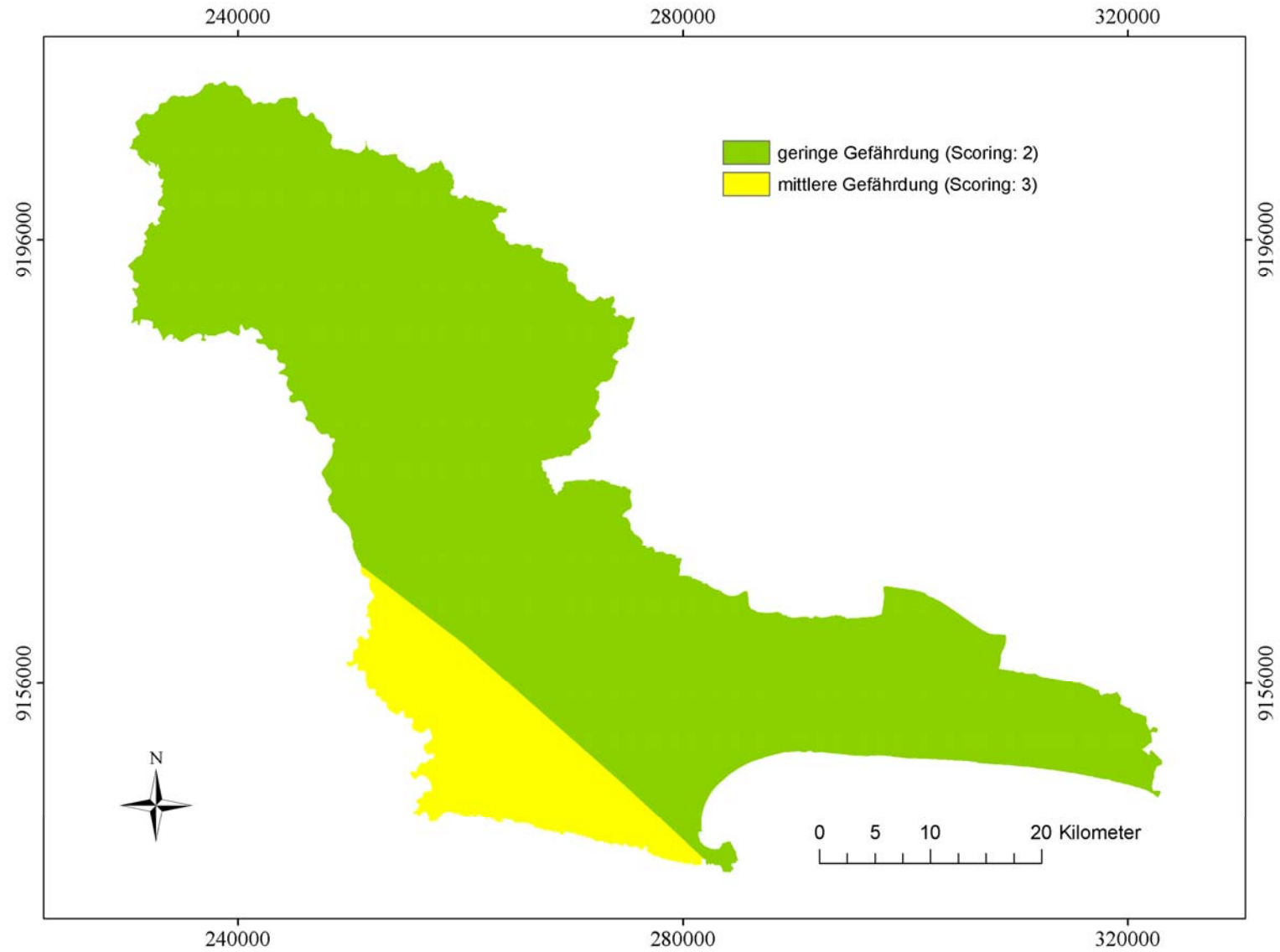


Abbildung 37: Gefahrenpotential durch Erdbeben als Ergebnis des Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

## 7.4 Tsunami

Den Eintrittswahrscheinlichkeiten wird in einem letzten Schritt ein Scoring zugewiesen. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten für Cilacap liegen zwischen 0 (0,01) und 17,21 Prozent, wie die Abbildung 38 verdeutlicht. Nun stellt sich die Frage, wie das Scoring bestmöglich an diese Werte angepasst wird. Würden die Werte um null Prozent ein Scoring von 1 und die Werte um 17 Prozent ein Scoring von 5 erhalten, so wären die Bereiche mit sehr hoher Gefährdung ausgewiesen. MARDIATNO et al. (2008) erhalten in ihrer Studie Eintrittswahrscheinlichkeiten von etwa 15 Prozent für die Küste Cilacaps, was die Plausibilität beider Ergebnisse erhöht. Sie betrachten diesen Wert allerdings *absolut* und ordnen ihm eine sehr hohe Gefährdung zu (MARDIATNO et al. 2008, 5). Doch entspricht eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 15 beziehungsweise 17 Prozent einem sehr hohen Gefahrenpotential? Um diese Frage zu beantworten, werden alle Tsunami-Analyseergebnisse Indonesiens betrachtet, die innerhalb derselben Studie seitens des DLR und Partner ermittelt wurden. So können die 17 Prozent *relativ*, das heißt in Beziehung zur gesamten indonesischen Küste betrachtet werden.

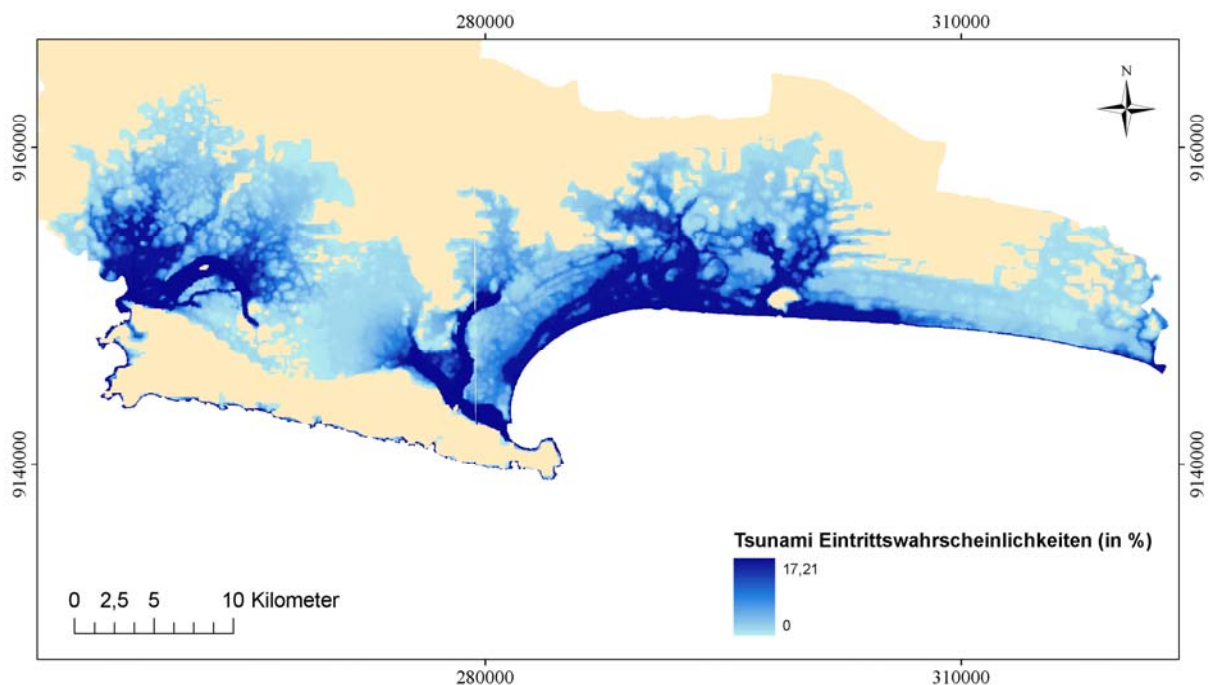


Abbildung 38: Eintrittswahrscheinlichkeiten für einen Tsunami in Cilacap (Darstellung: Stretched, Histogramm-ausgleich). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.



Es stellt sich heraus, dass Cilacap verhältnismäßig geringe Wahrscheinlichkeiten aufweist. Die höchste Eintrittswahrscheinlichkeit für Tsunamis in Indonesien findet sich an der Küste von Sumatra. Sie liegt bei 59,87 Prozent (unveröffentlichte Information, extrahiert aus dem Datensatz des DLR, Stand: September 2010). Da dieser Wert bis dato die maximale Grenze für Indonesien darstellt und die Werte für Cilacap ins Verhältnis gesetzt werden, erfolgt das Scoring in gleichmäßigen Intervallen zwischen 0 und 59,87.

*Tabelle 16: Intervalle der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Zuweisung des Scorings, basierend auf den empirisch ermittelten minimalen und maximalen Eintrittswahrscheinlichkeiten für einen Tsunami in Indonesien.*

*Quelle: Eigener Entwurf.*

Eintrittswahrscheinlichkeiten für Tsunamis in Indonesien (in %)	Scoring
0	0
0 - 11,97	1
11,97 - 23,95	2
23,95 - 35,92	3
35,92 - 47,90	4
47,90 - 59,87	5

Die Hazard-Map wird ebenfalls mit Klassenintervallen erstellt. Die Intervalle basieren auf den maximalen und minimalen Scoringwerten (die Gefahrenbereiche beginnen ab einem Scoring von 1, weshalb für die Klassenintervalle der Minimalwert 1 und nicht 0 herangezogen wird) und folgender Formel:

$$\text{Klassenintervall} = \frac{\text{maximaler Scoringwert} - \text{minimaler Scoringwert}}{\text{Anzahl der Gefahrenintervalle}} = \frac{5 - 1}{3} = 1,33$$

*Tabelle 17: Gefahrenintervalle für Tsunamis, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen.*

*Quelle: Eigener Entwurf.*

Gefährdung	Gefahrenintervall
Keine Gefährdung	0
Gering	1 - 2,33
Mittel	2,33 - 3,66
Hoch	3,66 – 5

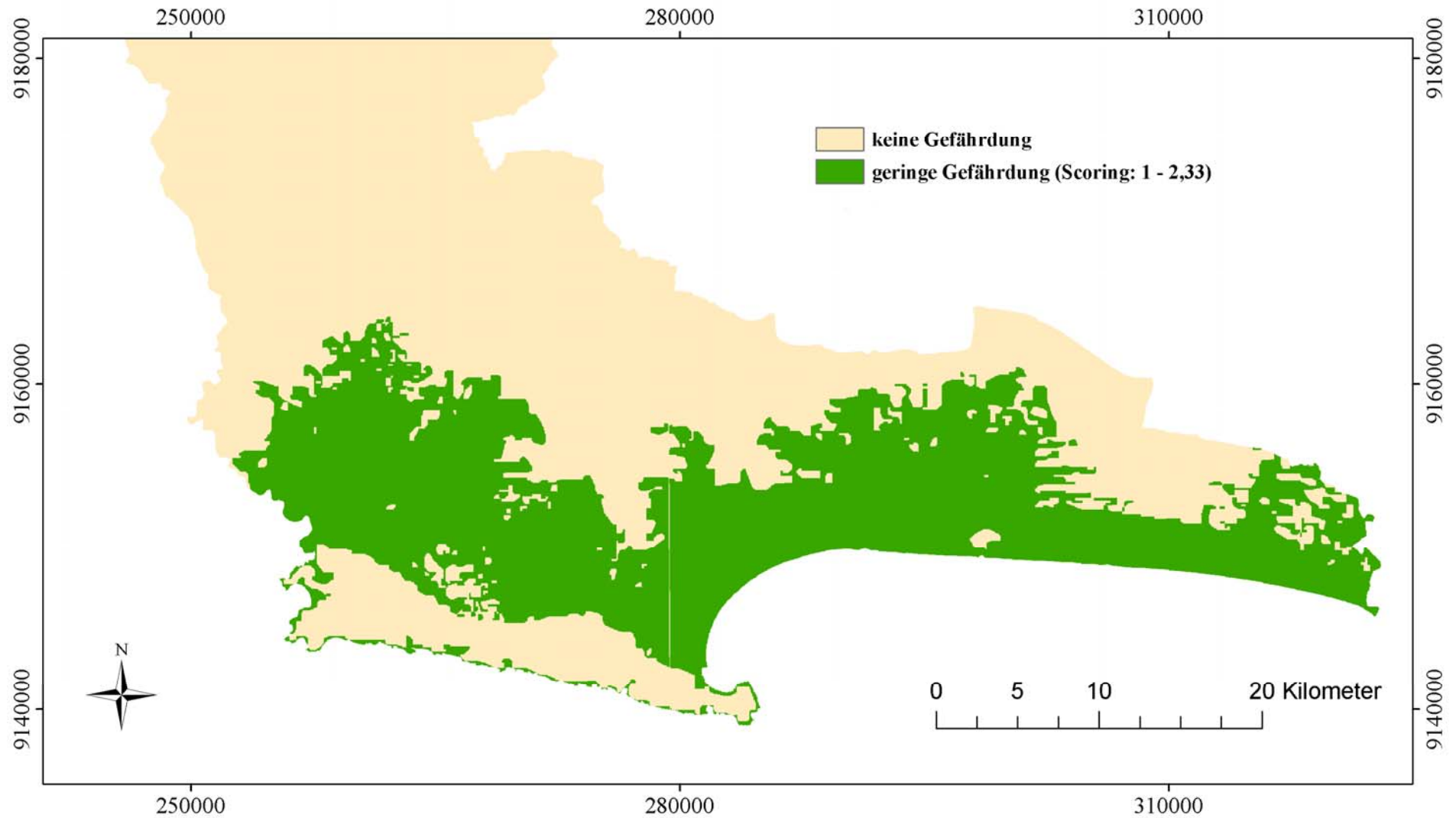


Abbildung 39: Gefahrenpotential durch Tsunamis als Ergebnis des Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit nimmt von der unmittelbaren Küste in das Landesinnere hinein kontinuierlich ab (s. Abbildung 38). Auffallend sind die Flussverläufe, die das Gefahrenpotential auch ins Landesinnere hin erhöhen.

Auf Grund des zugeordneten Scorings und der in der Arbeit verwendeten Gefährdungsintervalle (gering, mittel, hoch) wird das Ergebnis der Tsunamianalyse (Abbildung 39) stark generalisiert. 24,5 Prozent der Fläche Cilacaps weisen eine geringe Tsunamigefährdung auf. Hierzu zählt der gesamte Küstenbereich in seiner West-Ost-Ausdehnung. Der Gefährdungsbereich dehnt sich je nach Küstenlage zwischen vier und zehn Kilometer ins Landesinnere aus. Demgegenüber stehen 75,5 Prozent Flächenanteil, der keine Gefährdung aufzeigt. Dieser erstreckt sich hinter der Gefahrenzone ins gesamte Landesinnere und nimmt auch die Halbinsel *Nusakambangan Island* ein.

## 7.5 Multi-Hazard-Analyse

Die Hazard-Map der Multi-Hazard-Analyse wird ebenfalls mit Hilfe der Klassenintervalle erstellt. Die Intervalle basieren auf den maximalen und minimalen Scoringwerten, die sich aus der Gewichtung der Einzel-Hazard-Analysen ergeben, und folgender Formel:

$$\text{Klassenintervall} = \frac{\text{maximaler Scoringwert} - \text{minimaler Scoringwert}}{\text{Anzahl der Gefahrenintervalle}} = \frac{4,0456 - 0,626}{3} = 1,14$$

Tabelle 18: Gefahrenintervalle der Multi-Hazard-Analyse, basierend auf maximalen und minimalen Scoringergebnissen. Quelle: Eigener Entwurf.

Gefährdung	Gefahrenintervall
Gering	0,63 - 1,77
Mittel	1,77 - 2,90
Hoch	2,90 - 4,05

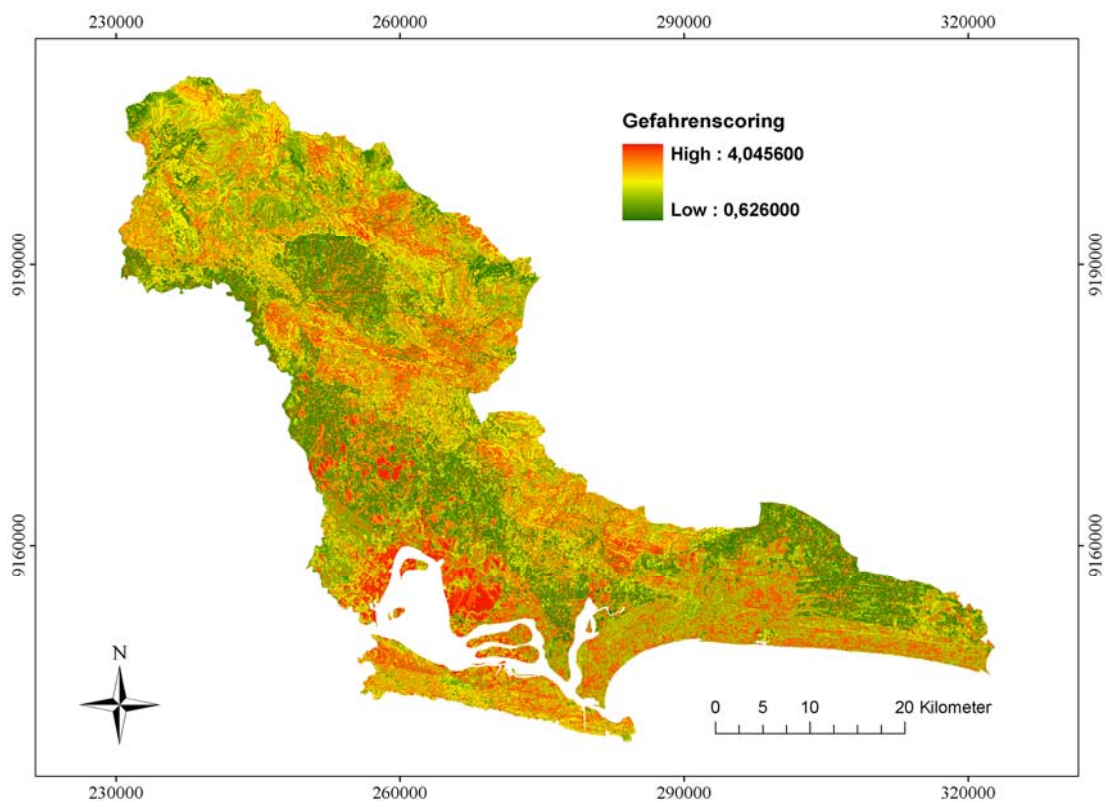


Abbildung 40: Die Gefährdung durch Rutschungen, Hochwasser, Erdbeben und Tsunamis (Darstellung: Stretched, Histogrammausgleich). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

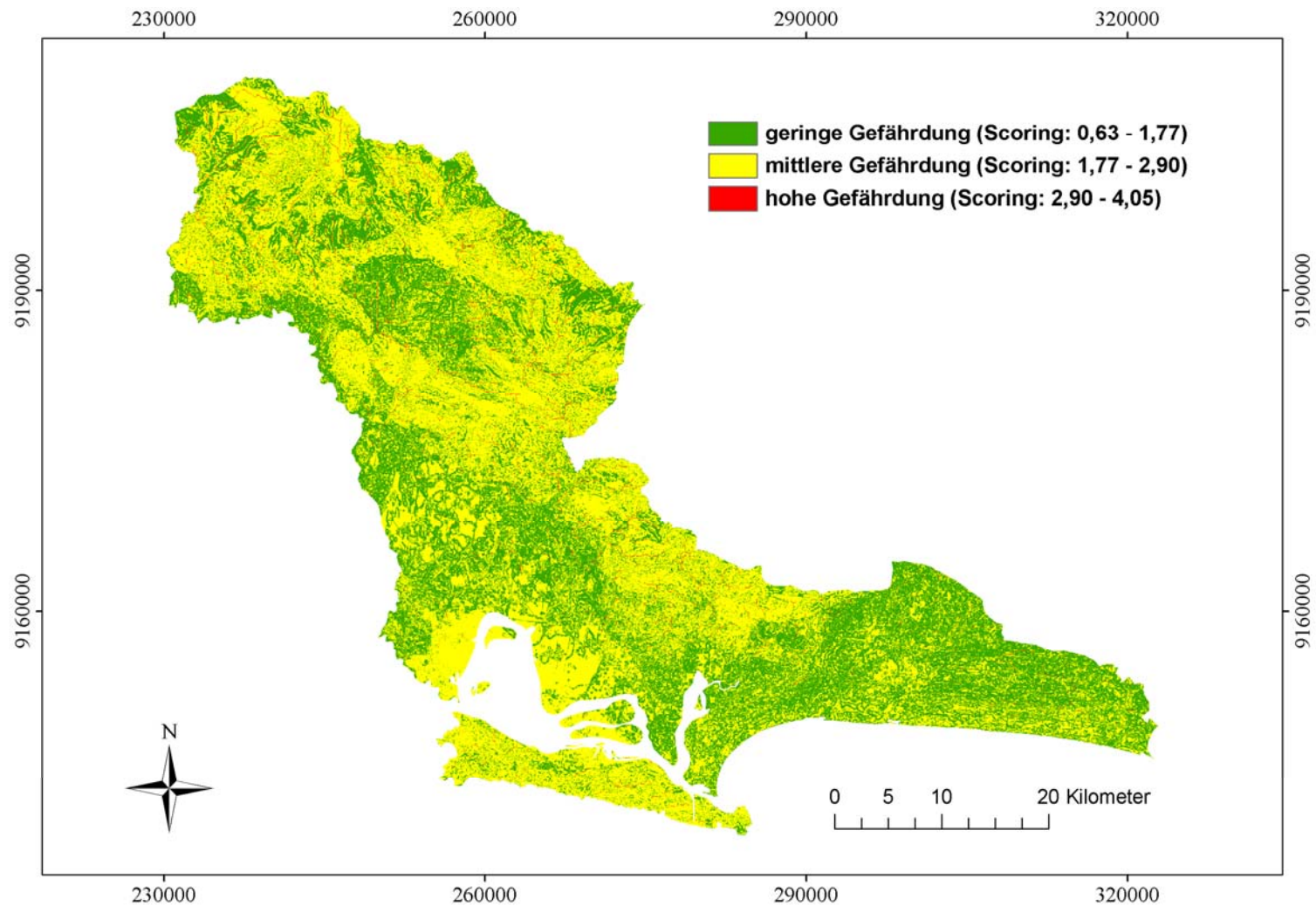


Abbildung 41: Gefahrenpotential durch Rutschungen, Hochwasser, Erdbeben und Tsunamis als Ergebnis des Scoring-Ansatzes. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S.  
Quelle: Eigene Darstellung.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Einzel-Hazard-Analysen, die bei einem Scoring von 0 keine Gefährdung aufweisen, zeigt die Multi-Hazard-Analyse Scoringwerte zwischen 0 und 5. Diese Werte resultieren aus der Gewichtung der vorangegangenen Analysen und den darin enthaltenen Nullwerten. Die Abbildung 41 zeigt die räumliche Verteilung der Gefährdung. Durch die Einteilung in drei Gefährdungsklassen ergeben sich Bereiche geringer, mittlerer und hoher Gefährdung. Die Gebiete geringer Gefährdung nehmen 40,7 Prozent der Gesamtfläche ein und liegen vor allem in der nördlichen Beckenlage, in Zentralcilacap sowie im Südosten. Auffallend ist die Verteilung der Bereiche mittlerer Gefährdung entlang dem erhöhten Relief im Nordwesten, in der Umgebung des Beckens sowie an dem sich in südöstlicher Richtung orientierenden Relief. Auch die Halbinsel an der Küste weist eine überwiegend mittlere Gefährdung auf. Der Flächenanteil der mittleren Gefährdung liegt bei 58,4 Prozent. Bereiche hoher Gefährdung sind kaum vorhanden und konzentrieren sich mit lediglich 0,9 Prozent entlang einiger Flussläufe. Durch das Ergebnis der Rutschungsanalyse ergibt sich eine Datenlücke im Südwesten Cilacaps.

## 8 Diskussion

Jede der fünf Analysen stößt auf methodische Grenzen. Die Ergebnisse geben einen Eindruck über die potentiellen Gefahrenbereiche, müssen allerdings auf ihre Plausibilität hin überprüft werden. Es handelt sich eher um eine vereinfachte Approximation als um eine Beschreibung der realen Verhältnisse. Es wird darauf hingewiesen, dass die Klassifikation eines jeden Ergebnisses zu einer Generalisierung führt. Je nachdem, wie die drei Gefahrenintervalle gewählt werden, fällt das graphisch dargestellte Ergebnis unterschiedlich aus und damit die ausgewiesenen Gefahrenzonen. In Anbetracht einer praktischen Anwendung der Ergebnisse muss dieser Aspekt berücksichtigt werden. Zudem stößt jede Methode auf Grund der Komplexität der natürlichen Systeme an ihre Grenzen. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse kritisch betrachtet und methodische Unzulänglichkeiten erläutert.

### 8.1 Gravitative Massenbewegungen

In Kapitel 8.1 wird das Ergebnis der Rutschungsanalyse dargestellt und diskutiert. Eine Betrachtung der Methodik gibt Aufschluss über die Einschränkungen des Ergebnisses.

#### 8.1.1 Ergebnis

Es ist ersichtlich, dass die Gebiete mit hoher Gefährdung im Bereich starken Reliefs zu finden sind. Hier dominiert der Faktor der Hangneigung, der das Potential für Rutschungen erheblich erhöht. Im Norden kommt das Vulkangestein hinzu, das für gravitative Massenbewegungen als besonders gefährdet eingestuft wird. In Zentralcilacap und auf der Halbinsel *Nusakambangan Island* kommt das Gefährdungspotential des Sandsteins zum Faktor Hangneigung hinzu. Der Bereich geringer beziehungsweise keiner Gefährdung im Nordwesten Cilacaps sind in einer Beckenlage und der daraus resultierenden Topographie sowie aus den Faktoren der Geologie und Pedologie begründet, die dort ein niedriges Scoring aufweisen. Obwohl die einzelnen Parameter der Analyse einem Scoring von 1 bis 5 unterzogen wurden, sind Bereiche ausgewiesen, die keine Gefährdung aufweisen. Dies resultiert aus der Bedingung, dass Bereiche mit einer Hangneigung unter fünf Prozent sowie Gewässer kein Rutschungspotential aufweisen. Gebiete mit geringerem Relief zeigen insgesamt eine niedrige, beziehungsweise keine Gefährdung und sind besonders in den Niederungen und im Küstenbereich zu finden.

Im Südosten Cilacaps variiert der Gefährdungsgrad zwischen keiner Gefährdung und geringer Gefährdung. Alle Inputparameter weisen in diesen Bereichen eine recht homogene Verteilung der Attribute auf – lediglich bei der Hangneigung gibt es kleinere Unterschiede, was die Gefährdung erklärt. Der fehlende Bereich im Südwesten Cilacaps ergibt sich aus Datenlücken innerhalb der Inputparameter wie der Geologie, Böden und Landnutzung. Vermutlich handelt es sich um Bereiche, die regelmäßig überflutet sind. Da keine genauen Daten hierzu vorliegen, wird diese Lücke akzeptiert, anstatt das Ergebnis durch eine Interpolation möglicherweise zu verfälschen.

Zur Validierung des Ergebnisses sind keine historischen Daten verfügbar. Die einbezogenen Inputparameter werden durch die Gewichtung in einem gemeinsamen Kontext berücksichtigt und das Ergebnis der Rutschungsanalyse erscheint auf Grund der erläuterten Punkte plausibel. Allerdings muss beachtet werden, dass die Gefahrenstufen für das Endergebnis von fünf (sechs) Stufen auf drei (vier) Gefährdungsbereiche reduziert wurde. Das Ergebnis wird dadurch übersichtlicher, allerdings auch generalisiert.

### **8.1.2 Kritische Methodenreflexion**

Unzulänglichkeiten entstehen durch die vereinfachte Betrachtung der Einflussparameter. BOLLINGER et al. (2004) betrachten in der Theorie weitaus mehr Parameter, die bei gravitativen Massenbewegungen von Bedeutung sind. Hierzu zählen Tektonik, Geologie, Hydrogeologie, Bodenmechanik, Topographie, Hangneigung und Hydrologie als Grunddispositionen, während Masse, Hangwasser, Porenwasser und Strömungsdruck unter anderen als variable Dispositionen genannt werden. Der Einfluss der Vegetation und des Menschen kommen hinzu (vgl. BOLLINGER et al. 2004, 8). Ebenso werden in der Analyse gravitative Massenbewegungen zusammengefasst betrachtet, obwohl es unterschiedliche Formen und Gefahrenpotentiale gibt, die nach BOLLINGER et al. (2004) und FELL et al. (2008) berücksichtigt werden sollten (BOLLINGER et al. 2004, 5; FELL et al. 2008, 87).

Einschränkungen liegen bei den Eingangsdaten vor. Die pedologischen und geologischen Daten sind stark generalisiert, sowohl in der Beschreibung als auch in der räumlichen Auflösung. Dies hat Folgen für die Genauigkeit der Analysen. Bei den tektonischen Daten muss berücksichtigt werden, dass keine Informationen zur Erfassung vorliegen. Handelt es sich um Klüfte oder Schluchten, die auf einem Satellitenbild digitalisiert wurden, oder um die Digitalisierung einer geologischen Karte? Nach SITHARAM et al. (2007) seien Fernerkundungsdaten



im Nahen Infrarot (NIR) ( $0,7\ \mu\text{m}$  -  $1,1\ \mu\text{m}$ ) zur Erfassung geologischer Strukturen geeignet (SITHARAM et al. 2007, 291).

Voraussetzung für eine Rutschungs-Hazardmodellierung ist die Erstellung eines DHM. Diese geben unter anderem Aufschluss über Hangneigung und Relief sowie hydrologische Abflusslinien (HUABIN et al. 2005, 554). Allerdings beinhalten diese Modelle Unsicherheiten: Die Höhendaten und deren Ableitungen können mit großen Unsicherheiten behaftet sein, je nach Qualität der Daten und dem Interpolationsverfahren des Analyseprogramms. Zudem können Diskontinuitäten der Höhenlage nur unzureichend erfasst werden. Strömungswege tendieren zu einem dendritischen Verlauf, der nicht den tatsächlichen Entwässerungslinien entspricht und häufig zu lang dargestellt wird (HUABIN et al. 2005, 555).

Die Festlegung des ersten Hangneigungsintervalls wurde nach eigener Einschätzung durchgeführt. Dies hat erhebliche Auswirkungen, da jede gravitative Massenbewegung, die unter fünf Prozent möglich wäre, außer Acht gelassen wird. Es ist zu vermuten, dass es sich unterhalb der fünf Prozent Neigung eher um Kriech- oder Fließbewegungen handelt, die in dieser Arbeit nicht Untersuchungsgegenstand sind. Dennoch muss auf diese Einschränkung hingewiesen werden. Hinzu kommt die Tatsache, dass die internen Wechselwirkungen unzureichend erfasst werden können. Die verschiedenen Parameter beeinflussen sich gegenseitig und sind wie Boden und Geologie voneinander abhängig. Die Geologie liefert das Ausgangsgestein für die Ausbildung der Böden (BLUME et al. 2010, 274).

Die subjektiven Einschätzungen beeinflussen das Ergebnis maßgeblich. Dies betrifft einerseits die Gewichtung der Eingangsparameter, andererseits die Auswahl der Gefahrenintervalle. Beides hat erhebliche Auswirkungen auf die Ausweisung von gefährdeten Gebieten. Daraus ergibt sich folgende Frage: Welche Intervalle sind richtig und können die Gefahrenlage realistisch darstellen? Eine Möglichkeit zur Validierung wäre der Vergleich mit historischen Daten von Hangrutschungen. So ließen sich die ausgewiesenen Gefahrengebiete mit den tatsächlichen Ereignisbereichen korrelieren und die Parameter der Analyse entsprechend anpassen. Leider liegen für Cilacap keine historischen Daten vor, die eine solche Kalibrierung der Wahrscheinlichkeit zuließen.

Zusätzlich könnten historische Hangrutschungen mit Niederschlagsaufzeichnungen verglichen werden, um einen Zusammenhang zwischen Massenbewegungen und Niederschlagsereignissen zu belegen. Für Cilacap sind keine detaillierten Aufzeichnungen über Rutschungsereignisse vorhanden, die über die Anzahl der Ereignisse hinausgehen. Ohne eine genaue zeitliche Auflösung können diese Ereignisse nicht mit meteorologischen Daten korreliert werden. Der bedeutendste Auslöser für Rutschungen – Starkregenereignisse – bleiben

damit unberücksichtigt. Könnten Gebiete mit verhältnismäßig niedrigen/hohen Niederschlagssummen oder einer geringen/hohen Frequenz von Niederschlagsereignissen innerhalb des Untersuchungsgebietes identifiziert werden, ließe sich das Gefahrenpotential gegebenenfalls anpassen und Abweichungen von der in dieser Arbeit durchgeführten Analyse wären möglich. Nach VARNES (1984) sei die Genauigkeit zur Vorhersage von Rutschungen nur geringfügig evaluiert und es sei kaum möglich, Zeit und Ort eines möglichen Ereignisses vorauszusagen (VARNES 1984, 11). Ebenso lässt das Ergebnis keine Schlüsse zur Eintrittswahrscheinlichkeit oder Größe eines Ereignisses zu.

Die Gewichtung der Parameter wirkt sich erheblich auf das Ergebnis aus. Orientierend an wissenschaftlichen Arbeiten beinhaltet diese auch eine subjektive Einschätzung. Die Wahl der Gewichtung ist anhand der vorliegenden Daten zum Teil schwierig und mit Unsicherheiten behaftet.

## 8.2 Hochwasser

Im Kapitel 8.2 wird das Ergebnis der Hochwasseranalyse diskutiert, die Plausibilität überprüft sowie methodische Grenzen aufgezeigt.

### 8.2.1 Ergebnis

Die Abbildung 36 weist eine geringe Gefährdung im Bereich des Reliefs auf, was sich unter Berücksichtigung der Hangneigung und des Hillshade bestätigt. Gleichzeitig zeigen die Flussläufe die höchste Gefährdung. Da der Niederschlag dem größten Gefälle folgend abfließt und sich in den Bereichen starker Hangneigung kaum stauen kann, erscheint dieses Ergebnis plausibel. In den Ebenen sind Bereiche von sowohl mittlerer als auch hoher Gefährdung vertreten, die sich kaum voneinander trennen lassen. Die Topographie betrachtend ist das Ergebnis einleuchtend, da sich der Niederschlag in den Niederungen sammelt. Es ist ersichtlich, dass sich die Hangneigung als wesentlicher Parameter des TOPMODEL-Ansatzes durchsetzt und die kleinräumige und unregelmäßige Struktur, insbesondere der mittleren Gefährdung, bedingt. Diese setzt sich sowohl in der detaillierten (s. Abbildung 34) als auch in der generalisierten Darstellung (s. Abbildung 36) durch. Auch die Verteilung der geringen Gefährdung auf erhöhten Bereichen gegenüber mittlerer Gefährdung in den umliegenden Niederungen (s. Abbildung 42) ist plausibel. Dies wird im Ergebnis des bodentopographischen Indexes hingegen fehlerhaft dargestellt (s. Kapitel 6.2.2), weshalb dieses nicht für die Multi-Hazard-Analyse verwendet wurde.

Die Abbildung 43 ermöglicht in Ansätzen einen visuellen Vergleich der Gefährdungsbereiche mit (zwei) dokumentierten Hochwasserereignissen. Die geringe Auflösung der Überflutungskarten von etwa 300 Metern schränkt den Vergleich erheblich ein. Die Gefährdung des topographischen Indexes stimmt nur bedingt mit den Hochwasserflächen überein. Betroffen sind auch Gebiete, die nach der Berechnung des topographischen Indexes auf eine eher geringe Hochwassergefahr schließen lassen. Der umgekehrte Fall ist ebenfalls erkennbar. Die Hochwasserkarte kann grob lediglich bestätigen, dass die Beckenlage für Hochwasser eine Gefährdung aufweist. Die Validierung des Analyseergebnisses ist nicht möglich.

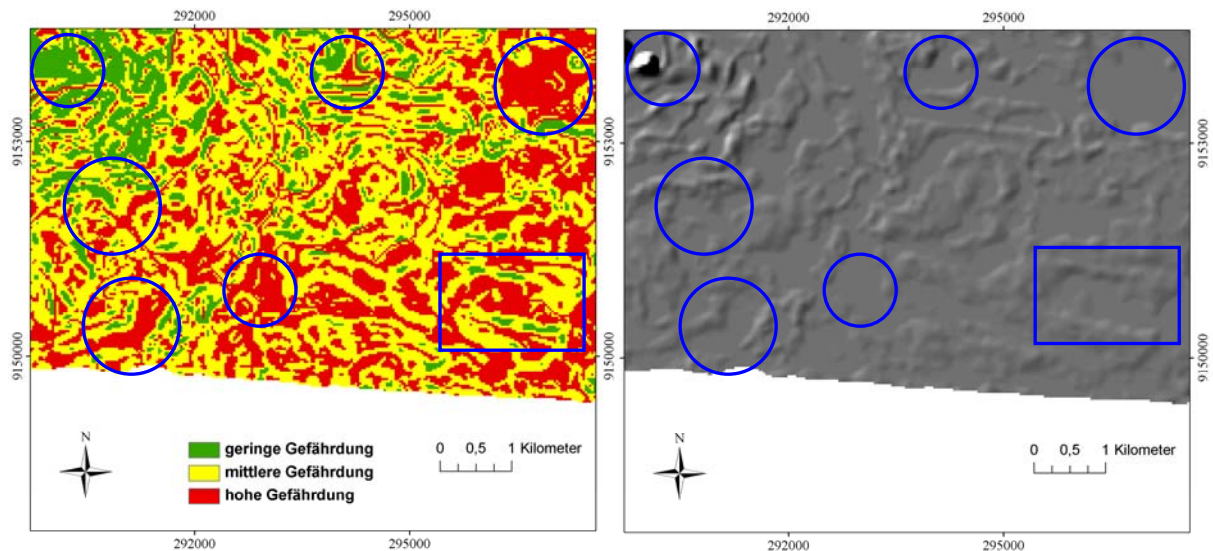


Abbildung 42: Plausibilitätsprüfung der Gefährdungsbereiche mit dem Hillshade am Beispiel der südöstlichen Küste Cilacaps. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Bereiche einer hohen Hochwassergefahr sind nicht in ganz Cilacap einleuchtend. Im Mikrobereich scheinen sie plausibel, doch auf der Makroebene können die Gefahrenbereiche angezweifelt werden. Es ist anzunehmen, dass die Beckenlage über ein Einzugsgebiet verfügt, welche das umliegende Relief einschließt (aus der hydrologischen Analyse ergibt sich, dass die administrative Grenze Cilacaps auf einer lokalen Wasserscheide liegt). Daraus folgernd müsste die Hochwassergefahr innerhalb des Beckens verhältnismäßig höher sein, sollte das Wasser langsamer abfließen als es akkumuliert. Es wäre allerdings möglich, dass der Abfluss hoch genug ist und sich die Wassermassen erst in den Niederungen nordwestlich der Stadt Cilacap aufstauen.

Das Ergebnis weist in der nördlichen Beckenlage geradlinige Strukturen auf, die sich durch die Topographie nicht erklären lassen. Eine Überprüfung der Eingangsdaten schließt Fehler im DHM aus. Die Strukturen resultieren aus der Anwendung des *Low-Pass-Filters*, der in Kapitel 5 beschrieben wird. Durch den Filter kommt es zu einer Verringerung der räumlichen Frequenz der Grauwerte beziehungsweise zu einer Glättung des Höhenmodells (s. Abbildung 44). Dies führt innerhalb des nördlichen Beckens zu einer recht homogenen Fläche, die sich wiederum auf die Berechnung der Fließrichtung und Fließakkumulation auswirkt. Daraus resultieren die geradlinigen Strukturen der Fließakkumulation. Die Anwendung des Filters ist dennoch wichtig, um Artefakte im Bild zu reduzieren. Wird der Prozess nicht durchgeführt, so treten Fehler in anderen Flächen Cilacaps auf, insbesondere im städtischen Bereich sowie entlang der Küste. Der aus dem Filter resultierende Informationsverlust zieht

Vorteile im städtischen Bereich und im flachen Umland mit sich, aber auch Nachteile im nördlichen Becken.

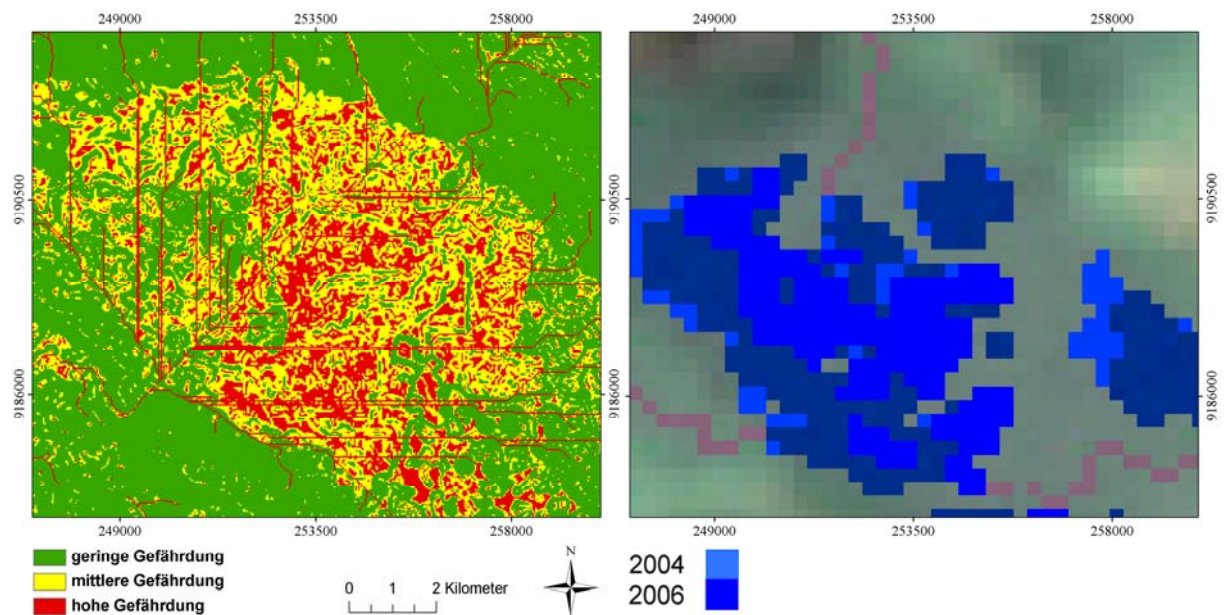


Abbildung 43: Vergleich der Gefährdungsbereiche mit Überflutungskarten (Quelle: Dartmouth). Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

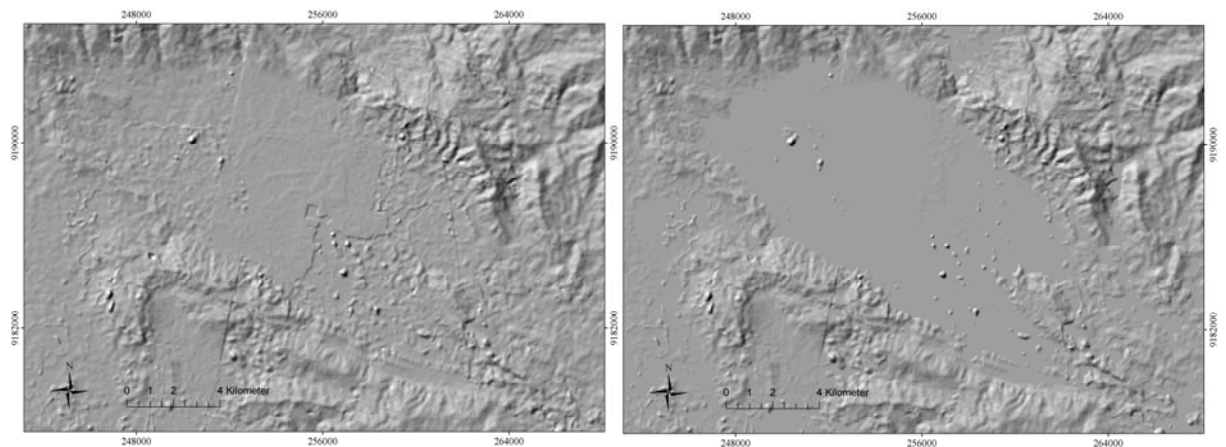


Abbildung 44: Auswirkungen des Low-Pass-Filters. Links ohne Filter, rechts geglättet. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Des Weiteren wird das Tool *Fill* betrachtet. Vor der Durchführung des Tools lassen sich durch ein Längsprofil des Beckens schmale Senken feststellen, die bis zu 60 Meter und mehr aufweisen. Unter Einbezug der umliegenden Höhenwerte werden diese von ArcGIS als künstliche Senken identifiziert und aufgefüllt. Der Prozess führt zusätzlich zu einer ebenen Beckenlage, was sich ebenfalls auf die Fließakkumulation auswirkt und das Ergebnis erklärt. Wird der z-Wert bei den Einstellungen des Filters modifiziert, so verändern sich auch die Ergebnis-

se der Fließrichtung und Fließakkumulation. Darüber hinaus lassen sich durch iterative Anpassungen des z-Wertes im gesamten Untersuchungsgebiet Veränderungen feststellen, die ihrerseits auf ihre Plausibilität angezweifelt werden könnten. Solche „Fehler“ im Ergebnis sind zu erwarten, da einige Prozessschritte Parameter aufweisen, die ihrerseits angepasst werden können. Jeder Prozessschritt, der in der Durchführung in Kapitel 6.2.2 erläutert wird, kann iterativ verändert werden. Da keine Inventare in Form von Überflutungskarten vorliegen, kann das Ergebnis nicht validiert werden. Folglich ist an dieser Stelle keine Alternative möglich, die nicht hinsichtlich der Plausibilität angezweifelt werden könnte.

Die Fließakkumulation wird, wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben, durch einen iterativ erfassten Schwellenwert begrenzt, um eine möglichst hohe Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Flussnetz zu erreichen. Dieser Schwellenwert wirkt sich wie alle anderen Prozessschritte auf das Endergebnis aus und muss bei der Interpretation des Ergebnisses berücksichtigt werden.

### **8.2.2 Kritische Methodenreflexion**

Bei der Hochwasseranalyse liegt die wesentliche und zugleich schwerwiegende Einschränkung vor, dass keine hydrologischen Daten für die Flüsse Cilacaps vorhanden sind. Unter Einbezug eines für Cilacap homogenen Messnetzes für Niederschlag und Verdunstung könnte eine Modellierung durchgeführt werden, die eine realistischere Gefahrenkarte ermöglichen würde. Auf Grund der fehlenden Daten wurde die Analyse mit Hilfe des *topographischen Indexes* durchgeführt. Nach VAZE et al. (2010) seien DHM eine anerkannte Datenquelle, um hydrologische Informationen abzuleiten (VAZE et al. 2010, 1086).

BEVEN (1997) betont, dass es sich bei dem TOPMODEL-Ansatz um eine relativ einfache Simulation der hydrologischen Prozesse sowie der Dynamik auf der Oberfläche handelt. Alle Rasterpunkte mit demselben Indexwert sind dem Ansatz zufolge in ihren hydrologischen Eigenschaften ähnlich. Hohe Indexwerte weisen auf eine rasche Sättigung innerhalb des betrachteten Einzugsgebietes hin. Auf Grund der vereinfachten hydrologischen Annahmen sei folglich auch der Nutzen nur in einfacher Form möglich und lässt keine komplexen Schlüsse zu (BEVEN 1997, 1069). Zudem erlaubt das Ergebnis – ebenso wie das der Rutschungsanalyse – keine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Ausmaß eines Hochwassers.

Andererseits liegen die Vorteile des Ansatzes in der vereinfachten und visuellen Darstellung in einem räumlichen Kontext. Er erfordert keine aufwendige Datenaufbereitung und nur ein Minimum an Eingangsdaten (BEVEN 1997, 1071, 1974). Selbst wenn die Durchlässig-

keitsbeiwerte  $K_f$  ( $K_{SD}$ ) der Böden verfügbar wären, so unterlägen auch diese gewissen dynamischen Prozessen, die nicht erfasst werden können (BEVEN 1997, 1077) – zumal die Daten der Pedologie und Geologie für Cilacap räumlich sehr generalisiert sind.

Nicht berücksichtigt werden die sich verändernden Profiltiefen der Böden und die damit verbundenen Veränderungen des hydraulischen Gradienten, insbesondere an Hängen mit stärkerer Neigung. Hinzu kommen Faktoren, welche die Grundwasserdynamik beeinflussen (BEVEN 1997, 1074). Die Grundwasserdynamik wird von BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) detailliert erläutert (vgl. BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996, 416-473). Komplexe Sachverhalte entstehen zudem in den Trockenphasen, in denen sich der hangabwärts gerichtete Abfluss nicht homogen über die Fläche verteilt, sondern lokal gesättigte Zonen auftreten können (BEVEN 1997, 1074).

Eine weitere Einschränkung liegt in den geologischen Gegebenheiten in Form von ausgedehnten Wasserschichten oder Grundwasserleitern, die unberücksichtigt bleiben (BEVEN 1997, 1075). Darüber hinaus fehlen im TOPMODEL-Ansatz wichtige Faktoren, die die Komplexität und Heterogenität der Hydrologie wiedergeben. Hierzu zählen unter anderen Interzeption, Schneeakkumulation und -schmelze, Infiltration und Evapotranspiration sowie ungesättigte Bodenzonen und deren Fließführung (BEVEN 1997, 1077).

Saisonale Flüsse werden vernachlässigt, da die Fließakkumulation sonst verfälscht wäre und nicht mehr den perennierenden Flüssen entsprechen würde, die als Ausgangslage betrachtet werden. Andererseits sollten die saisonalen Flüsse bei einer Hochwassermodellierung berücksichtigt werden, da es sich vermutlich um wiederkehrende Fließmuster handelt, die das Gefahrenpotential sowohl lokal als auch temporär erhöhen.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Rasterzellengröße beziehungsweise die Auflösung des DHM. Nach BEVEN (1997) läge diese in der Regel zwischen 10 Metern und 1 Kilometer, je nach Größe des Untersuchungsgebietes. Wichtig sei, dass die Zellgröße im Verhältnis zur Hanglänge nicht zu groß ist, da die Flussbahnen in diesem Fall kaum abzuleiten sind (BEVEN 1997, 1074; VAZE et al. 2010, 1087). Nach VAZE et al. (2010) sei eine Auflösung von 25 Metern oder höher in der Regel ausreichend zur Erfassung von Prozessen an der Erdoberfläche, allerdings sei je nach Anforderung auch eine Auflösung unter einem Meter notwendig (VAZE et al. 2010, 1087). Dennoch können in der Mikroskala Probleme auftreten. Dies betrifft einerseits künstliche Senken im Höhenmodell und andererseits die Flussbreite, sofern diese niedriger als die Zellgröße ist. Kleinere Flusskanäle können aus dem DHM nicht abgeleitet werden und bleiben somit unberücksichtigt, obwohl sie signifikanten Einfluss auf die Abflussrichtung nehmen (BEVEN 1997, 1075).

Großräumige Klüfte nehmen erheblichen Einfluss auf die Größe der Flusseinzugsgebiete und auf die Fließrichtung. Mit dem Tool *Fill* in ArcGIS werden solche Unregelmäßigkeiten im DHM als Fehler interpretiert und bereinigt, so dass diese Bereiche abgeflacht werden. Dabei werden die Rasterwerte an den niedrigsten Wert innerhalb einer Depression angepasst. So bleiben natürliche Depressionen dennoch im DHM erhalten. JENSON & DOMINGUE (1988) beschreiben einige Tools, die auch heute noch in ArcGIS implementiert sind. Validierungen haben hohe Übereinstimmungen zwischen Simulation und Realität gezeigt, was die Anwendbarkeit dieser Software bestätigt (vgl. JENSON & DOMINGUE 1988, 1599). Diese Tools dienen als Alternative zur Berechnung von gefährdeten Gebieten, da für das Untersuchungsgebiet keine hydrologischen Daten vorhanden sind, die eine komplexe Modellierung von Hochwasser erlauben würden. Nicht zuletzt wirkt sich das DHM durch die Auflösung sowie die Qualität der Daten – beispielsweise durch nicht behobene Artefakte – auf das Analyseergebnis aus.



### **8.3 Erdbeben**

Die Eingangsdaten der Erdbeben und das Ergebnis der Analyse enthalten erhebliche Einschränkungen. Auf Grund der fehlenden Metadaten zum Datensatz der Erdbeben sind keine Informationen verfügbar, die Auskunft über die Methodik erläutern. Sowohl das generalisierte Ergebnis als auch die fehlenden Metadaten schränken die Interpretationsmöglichkeiten und die Diskussion erheblich ein.

#### **8.3.1 Ergebnis**

Die Erdbebengefährdung ist auf Grund des Inputs sehr generalisiert und lässt keine Differenzierung zu, die einer besonderen Interpretation bedarf. Die tendenzielle Steigerung der Gefährdung in südwestlicher Richtung ist auf die räumliche Nähe zum Sunda- beziehungsweise Javagraben zurückzuführen, der für die seismische Aktivität verantwortlich ist. Es muss angemerkt werden, dass in der Realität keine solch geradlinige Abgrenzung von Erdbebenzonen möglich ist. Vielmehr erfolgt der Übergang solcher Bereiche in Form eines Gradienten, wie er aus dem Schwächungsgesetz beziehungsweise Abstandsgesetz resultiert. Die scharfe Abgrenzung der Zonen resultiert aus dem Verfahren, mit dem der Datensatz erstellt wurde. Genaue Informationen in Form von Metadaten sind nicht verfügbar und lassen folglich keine weitere Interpretation zu.

#### **8.3.2 Kritische Methodenreflexion**

Eine Kritik an der verwendeten Methode erscheint schwierig, da keine Metadaten zu dem Datensatz vorliegen. Kritisch zu betrachten ist die geringe Auflösung, die keinerlei regionale Aussagen ermöglicht. Vermutlich wurde der Datensatz aus historischen Aufzeichnungen unterschiedlicher Magnituden erstellt, woraus sich Zonen durchschnittlicher Bodenbeschleunigungen ergeben. GIARDINI & BASHAM (1993) zufolge sei diese Methode häufig herangezogen worden, allerdings seien die Daten zur Beschreibung der Bodenbewegung sowohl quantitativ als auch qualitativ sehr unterschiedlich (GIARDINI & BASHAM 1993, 11).

Sofern die Karte der Bodenbeschleunigung lediglich auf historischen Daten basiert, sind einige Kritikpunkte anzumerken. Die Erdbebengefährdung geht in der Regel von tektonischen Störungen aus. Dennoch kann die Gefährdung an der Erdoberfläche innerhalb einer Region erhebliche Unterschiede aufweisen. Geologie und Pedologie nehmen beträchtlichen Einfluss auf die Ausbreitung der seismischen Wellen. Je nach Material breiten sich diese mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus. Zudem ist die Beachtung der Böden notwendig, da die Auswirkungen der Wellenbewegung auch von der Korngrößenzusammensetzung und Stabilität der Böden abhängig sind. Beispielsweise neigen sandige und wassergesättigte Böden zu verstärkter Liquefaktion, was die Gefährdung stark erhöht.

## 8.4 Tsunami

Kapitel 8.4 beinhaltet eine Plausibilitätsprüfung der Tsunamigefährdungskarte. Räumliche Unterschiede in der Eintrittswahrscheinlichkeit werden erläutert und methodische Grenzen aufgezeigt und diskutiert.

### 8.4.1 Ergebnis

Nach der Analyse von MARDIATNO et al. (2008) seien die Strände, Drainagen und Sümpfe als Übergangsbereiche zwischen Ozean und Landesinnerem am stärksten gefährdet. Darüber hinaus sei der größte Teil der Stadt Cilacap relativ eben und weniger als zehn Meter über dem Meeresspiegel gelegen, was ebenfalls das Gefahrenpotential erhöht (MARDIATNO et al. 2008, 5ff.). Unter Berücksichtigung der Abbildung 39 und 46 lässt sich diese Aussage weitgehend bestätigen.

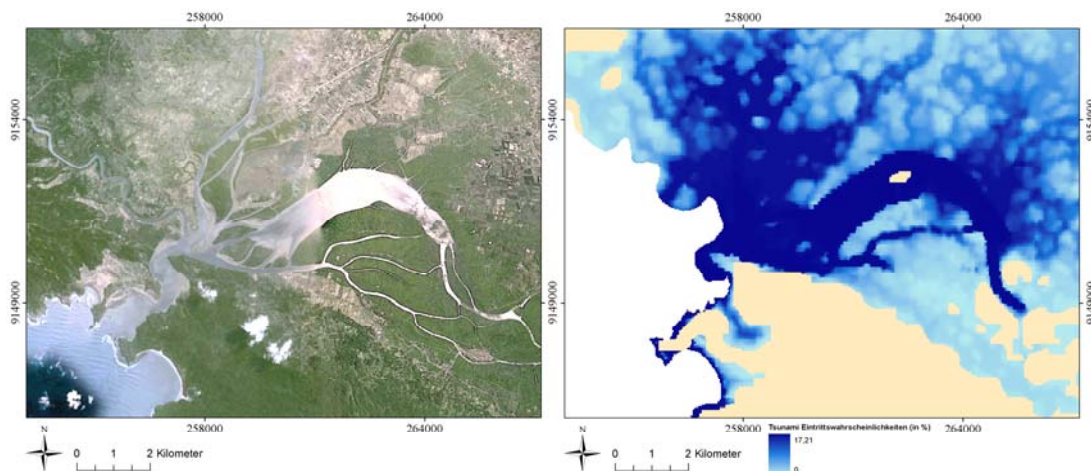


Abbildung 45: Visueller Vergleich eines Satellitenbildes (2010, Cnes Spot Image, Quelle: Google Earth) und der Tsunamigefährdung. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Der Bereich höherer Gefährdung weitet sich zudem durch die Flussverläufe ins Landesinnere aus. Auffallend ist die schützende Funktion der Halbinsel *Nusakambangan Island*, die die dahinter liegende Stadt auf Grund ihrer Topographie vor einem Tsunami schützt beziehungsweise dessen Magnitude verringert. Dies wurde auch bei dem Tsunami im Jahr 2006 beobachtet (MARDIATNO et al. 2008, 5; GAYER et al. 2010, 1681).

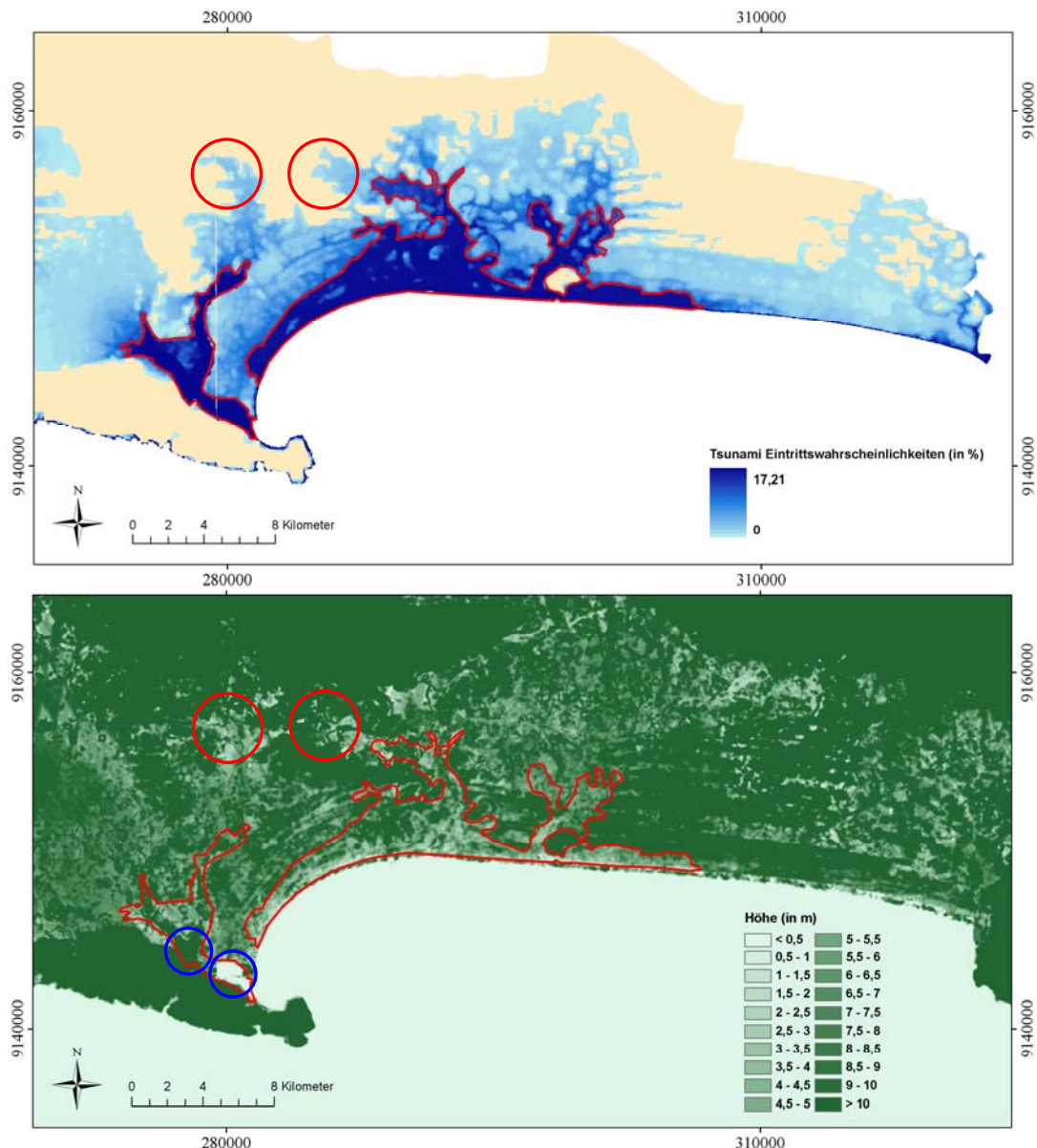


Abbildung 46: Vergleich des DEM mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten eines Tsunamis. Die markanten Bereiche sind rot hervorgehoben. Die blauen Bereiche enthalten Datenfehler im DEM, was die fehlerhafte Darstellung erklärt. Projektion in WGS 1984 UTM Zone 49 S. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abbildung 38 verdeutlicht, dass die unmittelbare Küste sowie die Uferbereiche der ins Landesinnere vordringenden Flüsse die höchste Gefährdung aufweisen. Durch die Flussläufe können die Wellen ungehindert ins Landesinnere vordringen. Das Satellitenbild (s. Abbildung 45) ermöglicht einen visuellen Vergleich mit dem Simulationsergebnis und bestätigt diese Vermutung. Besonders hoch ist das Gefahrenpotential im Bereich des Serayu River, der östlich des Stadtgebietes in den Indischen Ozean mündet (s. Abbildung 46). Der verhältnismäßig große Gefahrenbereich um die Mündung des Serayu River resultiert aus einer sehr flachen Küste, die erst nach mehreren hundert Metern stärker ansteigt. Wie zu erwarten, nimmt die

Gefährdung mit der Entfernung zur Küste ab. Kleinräumige Veränderungen resultieren aus Höhenunterschieden.

#### **8.4.2 Kritische Methodenreflexion**

Der Einfluss der versiegelten Fläche Cilacaps auf das Strömungsverhalten der Wellen wird in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt. Es ist anzunehmen, dass die Bauwerke einerseits die Magnitude der Wellen zu verringern vermögen, andererseits aber durch die Straßenverläufe und die Versiegelung eine Art Kanalisierung der Wellen beziehungsweise des Fließverhaltens ermöglichen. Erstes würde die Gefahr für dahinter liegende Bereiche verringern, zweites die Gefahr erhöhen. Da das Procedere der Analyse auf Grund der Aktualität noch nicht ausführlich dokumentiert ist, beruhen einige der folgenden Aussagen auf mündlichen Informationen von Mitarbeitern der involvierten Abteilung des DFD. Die verwendeten Daten liegen im „broad-scale-Bereich“ von 50 Metern, weshalb die Gegebenheiten der Siedlung nicht erfasst sind. In der hochaufgelösten Modellierung mit etwa fünf Metern Auflösung, die allerdings nur für einen kleineren Küstenabschnitt Cilacaps verfügbar ist, wird dieser Faktor durch einen Rauigkeitskoeffizienten miteinbezogen (vgl. GAYER et al. 2010, 1681f.). Somit werden der Einfluss von Siedlung und Vegetation zwar auf der Mikroskala, jedoch nicht im broad-scale-Bereich berücksichtigt.

Die Gefahrenanalyse weist Grenzen in der Auflösung auf. Für eine hochaufgelöste Modellierung müssten alle Daten – wie beispielsweise die Vegetation – in hoher Auflösung vorhanden sein, was jedoch häufig nicht der Fall ist. Hinzu kommt der enorme Rechenaufwand bei solch komplexen Analysen. Wenn auch exakter, würde eine Modellierung in der Mikroskala die realen Bedingungen ebenfalls nicht genau darstellen können.

Da die berechneten Wahrscheinlichkeiten auf der Frequenz und Magnitude der Ereignisse beruhen, werden sich auch diese mit jeder Erweiterung der Datenbank verändern. Durch diese dynamische Prozesskomponente stellt sich allerdings bei jedem Ereignis erneut die Frage, wie insbesondere die Magnitude im Vergleich zur Frequenz gewichtet wird. Beispielsweise würden Ereignisse wie das starke Beben, das den Tsunami im Dezember 2006 auslöste, die Statistik stark verändern, sollte diese auf einem arithmetischen Mittel beruhen. Die Frage, ob eine durchschnittlich höhere Gefährdung ausgewiesen werden sollte, muss kritisch unter Berücksichtigung der Frequenzen betrachtet werden.

Innerhalb der versiegelten Bereiche stellt sich auch die Frage, wie sich eine Kanalisation auf das Abflussverhalten beziehungsweise die Welle auswirkt. Beim Eintreffen der Welle wäre der Faktor hinsichtlich der hohen Wellenmagnitude vermutlich zu vernachlässigen. Doch könnte eine unterirdische Kanalisation das Wasser umleiten und ansonsten ungefährdete Bereiche durch steigende Wasserpegel fluten.

Eine weitere Einschränkung resultiert aus der Tatsache, dass nicht alle Ursachen berücksichtigt werden können, die Tsunamis auslösen. THIO et al. (2007) zufolge seien submarine Massenbewegungen und Erdbeben, bedingt durch Vulkanausbrüche, sowie durch Asteroiden verursachte Tsunamis vor allem im lokalen Maßstab von Bedeutung und sollten theoretisch nicht unberücksichtigt bleiben. Doch auch in deren Studie werden diese Faktoren auf Grund mangelnder Daten nur theoretisch eingebunden (THIO et al. 2007, 8). Nach BRUNE et al. (2010) gäbe es entlang des Sundagrabens mehrere Schwächezonen für submarine Rutschungen. Es träten viele Erdbeben mit Magnituden über 7.0 auf, die nicht nur Tsunamis, sondern auch submarine Massenbewegungen auslösen (BRUNE et al. 2010, 589). Sie dokumentieren einige bekannte Tsunamis (vgl. BRUNE et al. 2010, 591), die durch submarine Rutschungen ausgelöst wurden, betonen allerdings, dass die Anzahl vermutlich höher läge. Die Möglichkeit besteht, dass nicht alle Ereignisse aufgezeichnet wurden. Die Ursache eines Tsunami steht häufig in der Kontroverse, wird jedoch meist auf ein Erdbeben zurückgeführt. Der Tsunami aus dem Jahr 2006, der Zentraljava traf, sei wahrscheinlich auch durch eine submarine Rutschung ausgelöst worden. Darüber hinaus sei der Javagraben im Vergleich zu Sumatra auf Grund der tektonischen und geologischen Gegebenheiten entlang der Subduktionszone gefährdeter für solche Rutschungen (BRUNE et al. 2010, 591, 595). Dies betont, wie wichtig die Berücksichtigung solcher Auslöser für die Gefahrenanalyse ist. Allerdings fehlen ausreichende historische Daten.

Zuletzt ist anzumerken, dass das ursprüngliche Ergebnis der Analyse Eintrittswahrscheinlichkeiten aufwies, die jedoch zur weiteren Verarbeitung einem Scoring unterzogen wurden. Einerseits geht dadurch die Information der Wahrscheinlichkeiten verloren, andererseits wird dadurch die weitere Verwendung für die Multi-Hazard-Analyse ermöglicht.

## 8.5 Multi-Hazard

Die Multi-Hazard-Analyse beinhaltet alle Ergebnisse der vorangegangenen Analysen. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Frequenzen wurden die Naturgefahren einer Gewichtung unterzogen. Das Ergebnis sowie methodische Probleme hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen den Naturereignissen werden in diesem Kapitel dargestellt und erläutert. Eine theoretische Beschreibung der Wechselwirkungsanalyse als zukünftiger Ansatz zur Erfassung der komplexen Abhängigkeiten schließt das Kapitel.

### 8.5.1 Ergebnis

Das Ergebnis der Multi-Hazard-Analyse lässt sich nur bedingt auf seine Plausibilität prüfen. Der Einfluss der Eingangsparameter ist bei der klassifizierten Karte (s. Abbildung 41) kaum mehr sichtbar. Sie ist einerseits durch die Klassifikation übersichtlicher, andererseits gehen Informationen verloren. Es ist offensichtlich, dass die Multi-Hazard-Map die vorangegangenen Ergebnisse enthält und diese mehr oder weniger – je nach Gewichtung – widerspiegelt. Doch in welchen Bereichen ergibt sich welche Gefährdung durch welche Naturgefahr? Die Abbildung 47 stellt die Ergebnisse der Einzel-Hazard-Analysen gegenüber und ermöglicht eine detaillierte Interpretation. Die Markierungen zeigen markante Stellen in der Multi-Hazard-Map.

Ersichtlich ist, dass die Hanglagen sowohl im Norden als auch in Zentralcilacap im Verhältnis am stärksten gefährdet sind. Dies resultiert aus dem Ergebnis der Rutschungsanalyse (s. Abbildung 47 (a)), das mit einer Gewichtung von 33,2 Prozent in die Analyse eingeht. Auch auf der Halbinsel ist der Einfluss der Rutschungsgefahr festzustellen.

Die Hochwassergefährdung (s. Abbildung 47 (b)) lässt sich trotz hoher Gewichtung von 49,8 Prozent nur bedingt aus dem Endergebnis herauslesen. Die Flussläufe sowie die Niederungen mit einem hohen Scoring zeigen auf Grund der hohen Gewichtung eine starke Gefährdung. Wenngleich schwer erkennbar, dominiert auch in der Beckenlage die Gefährdung durch Hochwasser. Durch die Kombination der Rutschungs- und Hochwasseranalyse ergibt sich eine eher mittlere Gefährdung im steilen Relief im nördlichen Kartenausschnitt (vgl. Abbildung 47 (a) und (b) mit Abbildung 41). Das Ergebnis der Erdbebenanalyse lässt sich lediglich

im Südwesten im Übergangsbereich der beiden Gefahrenstufen (s. Abbildung 47 (c)) erkennen.

Der Einfluss der Tsunamigefährdung (s. Abbildung 47 (d)) lässt sich auf der Abbildung 41 sowohl im südwestlichen als auch südöstlichen Küstenbereich erkennen. Die Datenlücke im Südwesten ergibt sich aus dem Rutschungsergebnis. Obgleich nicht im Endergebnis enthalten, würde dieser Bereich eine verhältnismäßig hohe Gefährdung aufweisen, da die Gefährdung dort sowohl durch Hochwasser als auch durch Tsunamis hoch eingestuft wird.

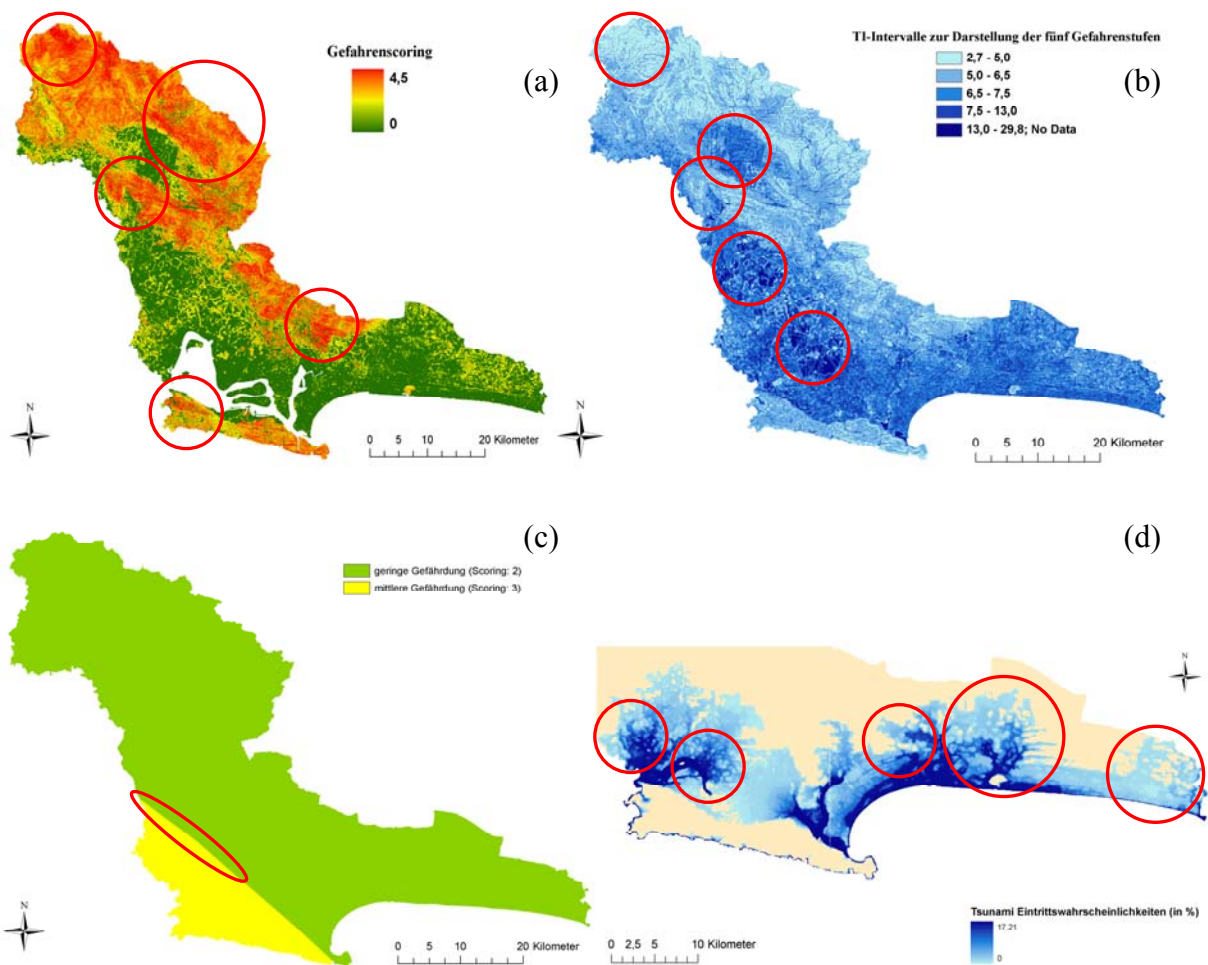


Abbildung 47: Vergleich der vier Einzel-Hazard-Analyseergebnisse: (a) Rutschungen, (b) Hochwasser, (c) Erdbeben, (d) Tsunami. Die Markierungen stellen markante Punkte in der Multi-Hazard-Map (Abbildung 40) dar. Quelle: Eigene Darstellung.



### 8.5.2 Kritische Methodenreflexion

Das Ergebnis der Multi-Hazard-Analyse verdeutlicht, dass die Einzel-Hazard-Maps für die weitere Interpretation und Auswertung wesentlich sind, wie es DI MAURO et al. (2004) betonen (DI MAURO et al. 2004, 4).

Jedes Ergebnis muss hinsichtlich der Anwendbarkeit kritisch betrachtet werden, da die Hazard-Maps keinen Aufschluss über Magnitude oder Intensität eines Naturereignisses geben. Darüber hinaus werden Gefährdungsbereiche ausgewiesen, in denen potentielle Naturereignisse auftreten können. Unbeachtet sind die Auswirkungen eines Ereignisses. Es können keine Aussagen über Eintrittszeit, Magnitude und Größe gemacht werden (HUABIN et al. 2005, 550; CARRARA et al. 1999, 126). Die Gefahrenkarte für gravitative Massenbewegungen zeigt Hanglagen, die ein erhöhtes Risiko für Rutschungen aufweisen. Solche Bereiche sind beispielsweise um das nördlich gelegene Becken zu finden, während die Beckenlage selbst eine niedrige Gefährdung zeigt. Sollte ein Hang in Bewegung geraten, so wären Siedlungen im Becken betroffen. Dieses Risiko wird jedoch durch eine Vulnerabilitätsanalyse bewertet, bei der wirtschaftliche Güter zur Erfassung eines potentiellen Schadens einbezogen werden. Dieser Aspekt muss bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Die Multi-Hazard-Map enthält das Gefahrenpotential Cilacaps für gravitative Massenbewegungen, Hochwasser, Erdbeben und Tsunamis. Eine entscheidende Einschränkung liegt sowohl in der Quantität und Qualität der Daten (DI MAURO et al. 2004, 5) als auch in den nicht berücksichtigten Wechselwirkungen der Naturereignisse (GREIVING 2006, 81). Naturereignisse weisen nichtlineare Zusammenhänge auf. Rutschungen können sowohl durch Erdbeben als auch durch heftige Niederschläge ausgelöst werden. Hinzu kommen niederschlagsbedingte Hochwasser, die ihrerseits für Rutschungen ursächlich sein können. Erdbeben erschüttern nicht nur den Erdboden, sondern können auch unterhalb der Meeresoberfläche Tsunamis auslösen. Diese wiederum können ebenfalls zu Hochwassern und Rutschungen führen. Die Wechselwirkungen sind kaum vorhersehbar und vielseitig. Durch die Gewichtung der Einzel-Hazard-Analysen wird lediglich die Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Ereignisses anhand der Frequenz annäherungsweise ermittelt. Die Wechselwirkungen können die Frequenz erheblich beeinflussen und erhöhen. Aus den historischen Daten, die für die Gewichtung verwendet wurden, ist nicht ersichtlich, ob Zusammenhänge zwischen den Ereignissen bestehen. Eine solche Bewertung ist schwierig, zumal eine Abhängigkeit auch über längere Zeiträume gegeben sein kann. Möglicherweise handelt es sich um eine scheinbare Korrelation, wenn beispielsweise zwei Ereignisse am selben Tag eintreten – was nicht bedeuten muss,

dass sie in einer Beziehung stehen. Durch die Anwendung der Delphi-Methode würde eine subjektive Einschätzung solcher Wechselwirkungen in die Gewichtung eingehen, doch die Zuverlässigkeit dieser Aussagen könnte angezweifelt werden. GREIVING (2006) zufolge sei auch dieser Ansatz nicht in der Lage der Komplexität der natürlichen Systeme gerecht zu werden (GREIVING 2006, 81). Zudem weisen GREIVING et al. (2006) darauf hin, dass auch die Delphi-Methode mit Mängeln behaftet ist. Das Verfahren muss zum Einen regelmäßig wiederholt werden, zum Anderen besteht die Möglichkeit, dass Extremereignisse wie der Tsunami im Dezember 2004 die individuelle Ansicht und damit die Gewichtung erheblich beeinflussen (GREIVING et al. 2006, 16f.).

Die Multi-Hazard-Map beschreibt eine durchschnittliche Gefährdung Cilacaps. Regionale Unterschiede zwischen den potentiellen Naturgefahren sind nicht mehr eindeutig und die Scoringwerte der Multi-Hazard-Analyse unterscheiden sich erheblich von denen der Einzel-Hazard-Analyse (vgl. GREIVING 2006, 81). Die Küste ist trotz einer hohen Gewichtung des Hochwassers und niedrigen Gewichtung der Tsunamis am stärksten durch Flutwellen gefährdet. Die Gebirgsregionen zeigen die höchste Gefährdung für gravitative Massenbewegungen und eine sehr niedrige Gefahr für Hochwasser. Durch die Gewichtung und die damit verbundenen Mittelwerte werden markante Gefahrenbereiche der einzelnen Naturereignisse überwiegend gemindert (vgl. Abbildung 41 und 47). Dies muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Des Weiteren muss beachtet werden, dass es sich bei der Multi-Hazard-Map – wie bei den anderen Ergebnissen auch – um eine Momentaufnahme handelt. Der Ansatz ist statisch und von der Aktualität der Eingangsdaten abhängig. Eine dynamische Komponente ist nötig, die das Gefahrenpotential entsprechend modifiziert und aktualisiert (GREIVING 2006, 81). Zudem findet die Multi-Hazard-Analyse nach DI MAURO et al. (2004) bisher nur für Naturgefahrenanalysen Anwendung, während technologische und industrielle Risiken weniger einbezogen werden. Eine wesentliche Herausforderung stellt die Vergleichbarkeit anthropogen und natürlich verursachter Gefahren sowie die Durchführung einer multiplen Vulnerabilitätsanalyse dar (DI MAURO et al. 2004, 5).

Statistische Schätzverfahren wie beispielsweise die Wechselwirkungsanalyse sind möglicherweise in der Lage, dieses methodische Problem zu lösen. Diese Prognosetechnik versucht, die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen, zukünftig eventuell auftretenden Ereignissen darzustellen und deren gegenseitigen Auswirkungen zu berücksichtigen (UNITED NATIONS UNIVERSITY 1994, 4). Auch MERZ (2006) betont die Bedeutung der Abhängigkeiten zwischen Ereignissen, wenn zwei oder mehrere Komponenten in einem System zeitnah ver-

sagen (MERZ 2006, 34). Die Lösung dieses methodischen Problems liegt im wissenschaftlichen Fokus der gegenwärtigen Szenariotechnik und ist neben anderen Bereichen für das Risikomanagement von wesentlicher Bedeutung, um signifikante Multi-Hazard-Analysen durchführen zu können.

## 9 Die Wechselwirkungsanalyse als künftiger Ansatz der Multi-Hazard-Analyse?

Die Wechselwirkungsanalyse (*Cross-Impact Analysis*) wurde 1966 von Theodor Gordon und Olaf Helmer entwickelt. Es handelt sich um einen analytischen Ansatz, der die Wahrscheinlichkeit eines zukünftig möglicherweise eintretenden Ereignisses unter Bezugnahme der Abhängigkeiten weiterer Ereignisse zu berechnen versucht. In einem ersten Schritt wird die Anzahl an zu berücksichtigenden Ereignissen ermittelt. Die Anzahl der gegenseitigen Abhängigkeiten übersteigt meist die Anzahl der untersuchten Ereignisse. Weiter werden die anfänglichen Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Ereignisse geschätzt – davon ausgehend, dass die anderen Ereignisse zu diesem Zeitpunkt noch nicht eingetreten sind. Durch Experteneinschätzungen können andere Ereignisse auch bei der Schätzung der einleitenden Wahrscheinlichkeit miteinbezogen werden. Eine vollständige Ereignismatrix (s. Tabelle 19) zeigt letztendlich, wie sich unerwartete Veränderungen oder Ereignisse auf die Wahrscheinlichkeiten aller berücksichtigten Ereignisse auswirken. In einem weiteren Schritt werden die bedingten Wahrscheinlichkeiten geschätzt. Falls Ereignis A eintritt, wie verändert sich dann die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten beziehungsweise Nicht-Eintreten des Ereignisses B? Diese Frage muss für jede mögliche Kombination aus eintretendem und einwirkendem Ereignis innerhalb der Wechselwirkungsmatrix beantwortet werden (UNITED NATIONS UNIVERSITY 1994, 4f.).

Tabelle 19: Die Wahrscheinlichkeitsmatrix der Wechselwirkungsanalyse. Quelle: verändert nach UNITED NATIONS UNIVERSITY 1994, 7.

Wenn dieses Ereignis eintritt...	Anfangswahrscheinlichkeit	... verändert sich die Eintrittswahrscheinlichkeit von...			
		Ereignis 1	Ereignis 2	Ereignis 3	Ereignis 4
Ereignis 1	0,25		0,50	0,85	0,40
Ereignis 2	0,40	0,6		0,60	0,55
Ereignis 3	0,75	0,15	0,50		0,60
Ereignis 4	0,50	0,25	0,70	0,55	

Die Wechselwirkungsanalyse weist allerdings auch Nachteile auf. Werden potentiell bedeutsame Ereignisse ignoriert, wirkt sich dies auf die gesamte Matrix und damit auf die bedingten Wahrscheinlichkeiten aus. Des Weiteren kann keine bedingte Wahrscheinlichkeit null betragen, da die daraus folgenden Wahrscheinlichkeiten nicht weiter berechnet werden könn-

ten (UNITED NATIONS UNIVERSITY 1994, 4f.). Weiter können durch diese Matrix nur zwei Ereignisse miteinander korreliert werden, obwohl Abhängigkeiten zwischen mehreren Ereignissen möglich sind. Sollten die Ergebnisse unplausibel erscheinen, ist der Wissenschaftler gezwungen, die gesamten Wahrscheinlichkeitseinschätzungen zu überdenken. Zudem steigt der Rechen- und Zeitaufwand erheblich mit zunehmender Zahl an einkalkulierten Ereignissen. Bei einer Matrix von zehn Ereignissen ergeben sich 90 Wahrscheinlichkeitsberechnungen, bei 40 Ereignissen sind es bereits 1560 (UNITED NATIONS UNIVERSITY 1994, 12). Der Zeit- und Datenaufwand ist für diese Analyse erheblich, allerdings erlaubt sie in Ansätzen die Beachtung gegenseitiger Abhängigkeiten, was die Multi-Hazard-Analyse bisher nicht zu bewältigen vermag.

## 10 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand der Hazard-Analysen gegeben, die zur Abschätzung von Gefahrenpotentialen dienen. Die Einzel-Hazard-Analysen beruhen auf jahrelanger Entwicklung und auf unterschiedlichen Ansätzen zur Risikoabschätzung eines Naturereignisses. Die Ergebnisse der durchgeführten Hazard-Analysen lassen sowohl allgemeingültige als auch speziell für das Untersuchungsgebiet Cilacap Schlussfolgerungen zu, die im Folgenden dargestellt werden.

### **Die Einzel-Hazard-Analysen: ein Rückblick**

Rechnergestützte Analysen besitzen gegenüber Geländekartierungen den Vorteil, dass sie weniger kosten- und zeitintensiv sind, obgleich sie zur Datenerhebung Feldarbeiten voraussetzen. Die Erhebung von Daten sowie deren Vorverarbeitung und die Auswahl einer geeigneten Methode sind aufwendiger als die eigentliche Durchführung. Die Analyse der gravitativen Massenbewegungen erlaubt eine plausible Identifizierung gefährdeter Bereiche in Cilacap und berücksichtigt diverse Einflussfaktoren. Die gewählte Methode erlaubt eine – wenn auch zeitintensive – Aktualisierung der Parameter. Der Nachteil liegt weniger in der Methode als in der Qualität der Daten: Durch eine höhere Auflösung und genauere Beschreibung der enthaltenen Attribute wären bessere Einschätzungen möglich gewesen, die sich auf die Gewichtung der Parameter auswirken.

Die Analyse der Hochwassergefahr wurde ohne meteorologische und hydrologische Daten durchgeführt. Der topographische Index bietet sich bei einem Mangel an Daten an, um hydrologische Gegebenheiten eines Gebietes in ihren Grundzügen zu erfassen. Die Anwendung des bodentopographischen Indexes war für das Untersuchungsgebiet nicht möglich, da sich die Topographie und die versiegelte Fläche nicht vereinbaren ließen und fehlerhafte Ergebnisse zur Folge hatten. Der Vorteil des topographischen Indexes liegt in den geringen Anforderungen an die Daten bei einem dennoch akzeptablen Ergebnis. Nichtsdestotrotz liefert dieser Ansatz ein stark generalisiertes Abbild der Realität und erlaubt keine detaillierten hydrologischen Aussagen – was die Einschätzung unterschiedlicher Gefahrenpotentiale durch Hochwasser erheblich erschwert.

Die Erdbebendaten in Form der durchschnittlichen Bodenbeschleunigung Javas sind stark vereinfacht. Die geringe Datenverfügbarkeit führt in dieser Arbeit zu einer erheblichen Ein-

schränkung. Prinzipiell bieten solche Karten einen guten Überblick, sofern sie eine Auflösung im Mikrobereich aufweisen.

Die Analyse der Tsunamieintrittswahrscheinlichkeiten basiert auf Simulationen des AWI und des DLR, die je nach Eingangsdaten hochauflösende Ergebnisse ermöglichen. Nachteile sind der hohe Daten-, Zeit- und Rechenaufwand. Allerdings lassen sich die Daten durch eine Datenbank aktualisieren, so dass der Ansatz eine dynamische Komponente enthält.

Die Analyse der gravitativen Massenbewegungen erlaubt eine plausible Identifizierung gefährdeter Bereiche in Cilacap, die insbesondere im Bereich erhöhten Reliefs zu finden sind. Die Flussläufe und Niederungen in Cilacap weisen das höchste Gefahrenpotential für Hochwasser auf. Die Erdbebengefährdung für Cilacap ist als gering bis mittel einzuschätzen und zeigt eine tendenzielle Steigerung der Gefährdung in südwestlicher Richtung. Die Gefahr durch Tsunamis ist – in relativer Betrachtung zur gesamten indonesischen Küste – als gering einzustufen, betrifft im Falle eines Ereignisses allerdings die gesamte Küste Cilacaps. Lediglich die Halbinsel *Nusakambangan Island* weist auf Grund eines höheren Reliefs keine Gefährdung auf.

### **Die Aussagekraft der Gefahrenkarte und die Problematik der Datenverfügbarkeit**

Die Ergebnisse der Hazard-Analysen müssen kritisch betrachtet werden, da sie ein generalisiertes Abbild der räumlichen Gefährdung darstellen. Die Auswahl der Methode muss berücksichtigt werden. Sowohl die Durchführung der Analyse als auch die graphische Darstellung der Gefahrenbereiche sind von der Quantität und Qualität der Daten sowie von subjektiven Einschätzungen abhängig. Die Dokumentation historischer Ereignisse weist erhebliche Mängel auf – ist allerdings für eine Validierung der Ergebnisse von großer Bedeutung. Hydrologische und meteorologische Daten würden eine komplexe Modellierung verschiedener Hochwasserszenarien erlauben. Durch höher aufgelöste Daten ließen sich für Cilacap insgesamt signifikantere Ergebnisse erzielen. Zudem ist das in allen durchgeführten Analysen verwendete Scoring eine metrische Skala. Es lässt keine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses zu. Die Ergebnisse ermöglichen zwar die Identifizierung potentiell gefährdeter Räume, geben jedoch keinerlei Aufschluss über Eintrittszeit, Magnitude und Größe eines Ereignisses. Die Wahrscheinlichkeiten, wie sie seitens AWI und DLR für die Tsunamis berechnet wurden, müssten auch für andere Naturereignisse mit zeit- und rechenintensiven Methoden ermittelt werden. So könnte die Aussagekraft sowohl der Einzel- als auch der Multi-Hazard-Map erheblich verbessert werden. Jedes Untersuchungsgebiet erfordert eine indivi-

duelle Analyse – weder die Gefahrenkarte noch die ausgewählte Methode lassen sich zu hundert Prozent auf eine andere Region übertragen. Die vorliegenden Ergebnisse gelten ausschließlich für die Regentschaft Cilacap.

### **Die Multi-Hazard-Map als autonomes Instrument zur Ausweisung gefährdeter Regionen?**

Die Multi-Hazard-Analyse bildet einen neuen Ansatz, der verschiedene Naturgefahren eines Untersuchungsgebiets kombiniert und das gesamte Gefahrenpotential zu erfassen versucht. Der Vorteil der Methode liegt in der Darstellung des kombinierten Gefahrenpotentials verschiedener Naturereignisse. Die Ergebnisse werden nicht einzeln, sondern aggregiert betrachtet. Allerdings erfordert diese Analyse die Ergebnisse der Einzel-Hazard-Analysen, was indirekt einen hohen Zeit- und Datenaufwand zur Folge hat. Die auf den Frequenzen der Naturgefahren basierende Gewichtung erscheint plausibel. Allerdings sind Datenlücken in den Zeitreihen wahrscheinlich.

Das Ergebnis der Multi-Hazard-Analyse lässt den Schluss zu, dass in Cilacap von den Bereichen mit höherem Relief das höchste Gefahrenpotential für das Eintreten eines Naturereignisses ausgeht. Dennoch darf die potentielle Gefahr beispielsweise im nördlichen Becken sowie entlang der Küste nicht unterschätzt werden. Im Vergleich erscheinen diese Bereiche durch eine Kombination aller Gefahrenkarten als gering gefährdet, allerdings kehrt sich dieses Bild bei der Betrachtung der einzelnen Ergebnisse um.

Die These, dass das Ergebnis der Multi-Hazard-Analyse ohne die jeweils isolierte Betrachtung der einzelnen Naturereignisse nur eingeschränkte Aussagen über die Gefährdung eines Gebietes ermöglicht, wurde bestätigt. Anhand des Ergebnisses der Multi-Hazard-Analyse lässt sich die Frage, welche Naturgefahr Cilacap am stärksten bedroht, nur bedingt beantworten. Die Hochwassergefährdung geht – auf Grund der Häufigkeit als Kriterium – mit der höchsten Gewichtung in die Multi-Hazard-Analyse ein. Doch lässt sich behaupten, dass Hochwasser das höchste Gefahrenpotential für Cilacap aufweisen? Wird die Häufigkeit betrachtet, so geht von gravitativen Massenbewegungen und Hochwasser das höchste Gefahrenpotential aus. Würden die Magnituden und Schäden herangezogen, so wären möglicherweise Erdbeben und Tsunamis die größte Bedrohung. Zudem müssen die regionalen Unterschiede zwischen den potentiellen Naturgefahren beachtet werden. Die Küste ist trotz einer hohen Gewichtung des Hochwassers und einer niedrigen Gewichtung der Tsunamis am stärksten durch Flutwellen gefährdet, wohingegen die Gebirgsregionen die höchste Gefährdung für



gravitative Massenbewegungen und eine sehr niedrige Gefahr für Hochwasser zeigen. Durch die Gewichtung und die damit verbundenen Mittelwerte werden markante Gefahrenbereiche der einzelnen Naturereignisse überwiegend gemindert. Die Ergebnisse zeigen, dass jedes Naturereignis ein spezifisches und räumliches Gefahrenpotential birgt, weshalb keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann.

### **Die Multi-Hazard-Analyse: ein Ausblick**

Die Herausforderung der Multi-Hazard-Analyse liegt in der Einschätzung der Wechselwirkungen verschiedenster Naturereignisse. Die Abhängigkeiten sind kaum zu erfassen und entsprechend schwierig zu modellieren. Ein künftiger Weg zur Bewältigung dieses Problems könnte die Wechselwirkungsanalyse (*Cross-Impact Analysis*) darstellen, welche die Zusammenhänge zwischen verschiedenen, zukünftig potentiellen Ereignissen zu analysieren und deren wechselseitige Auswirkungen zu berücksichtigen versucht. Durch eine ausführliche Untersuchung ließe sich die Anwendbarkeit der Wechselwirkungsanalyse im Bereich der Hazard-Analysen prüfen. Zudem könnte – unter größerem Zeitaufwand – die Delphi-Methode für zuverlässige Experteneinschätzungen der Wechselwirkungen und Gefahrenpotentiale herangezogen werden.

### **Die Hazard-Analyse als präventive Maßnahme**

Risiko- und Gefahrenanalysen bilden eine Grundlage für die Prävention und Adaption. Naturereignisse lassen sich weder aufhalten noch signifikant beeinflussen. Die betroffenen Menschen können lernen die Gefahr einzuschätzen und sich an die Gegebenheiten anpassen. Präventive Maßnahmen verringern nicht die potentielle Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses. Durch die Hazard-Analysen lassen sich gefährdete Gebiete aber identifizieren und damit Handlungsmöglichkeiten schaffen.

## **Literaturverzeichnis**

- ABELE, G. (1994): Felsgleitungen im Hochgebirge und ihr Gefahrenpotential. In: Geographische Rundschau 46, S. 414-420.
- ALBERS, S.; SKIERA, B. (1999): Regressionsanalyse. In: HERRMANN, A.; HOMBURG, C. (Hrsg.): Marktforschung. Grundlagen – Methoden – Anwendungen. Wiesbaden. S. 205-236.
- ALCÁNTARA-AYALA, I. (2002): Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. In: Geomorphology 47, S. 107-124.
- ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. (1999): Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment 58, S. 21-44.
- AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY (2007): Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. In: Journal and News of the Australian Geomechanics Society 42 (1), S. 12-36.
- BAUMGARTNER, A.; LIEBSCHER, H.-J. (1996): Allgemeine Hydrologie – quantitative Hydrologie. Berlin, Stuttgart.
- BEVEN, K. (1997): TOPMODEL: A Critique. In: Hydrological Processes 11, S. 1069-1085.
- BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G. W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg.
- BOLLINGER, D.; KEUSEN, H.R.; ROVINA, H.; WILDBERGER, A.; WYSS, R. (2004): Gefahreneinstufung Rutschungen i.w.S.. Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren (Entwurf). Bundesamt für Wasser und Geologie. Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie (SFIG). Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren, S. 1-44.
- BRUNE, S.; BABEYKO, A. Y.; LADAGE, S.; SOBOLEV, S. V. (2010): Landslide tsunami hazard in the Indonesian Sunda Arc. In: Natural Hazards and Earth System Sciences 10, S. 589-604.
- BRYANT, E. (2008): Tsunami. The Underrated Hazard. Berlin, Heidelberg.

- CARRARA, A.; GUZZETTI, F.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. (1999): Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. In: *Natural Hazards* 20, S. 117-135.
- CASCINI, L. (2008): Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. In: *Engineering Geology* 102, S. 164-177.
- D'ARRIGO, R.; SMERDON, J. E. (2008): Tropical climate influences on drought variability over Java, Indonesia. In: *Geophysical Research Letters* 35, S. 1-5.
- DI MAURO, C.; BOUCHON, S.; CARPIGNANO, A.; GOLIA, E.; PERESSIN, S. (2006): Definition of multi-risk maps at regional level as management tool: experience gained by civil protection authorities of piedmonte region. Institute for the protection and Security of the Citizen, University of Pisa. S. 1-12.  
<http://conference.ing.unipi.it/vgr2006/archivio/Archivio/2006/Articoli/700196.pdf>, 22. Juni 2010.
- DLR/GTZ (2009): Tsunami Hazard Maps for Bali. Technical Documentation. Presented by Balinese Working Group for Tsunami Hazard Mapping. S. 1-32.  
[http://nadine.helmholtz-eos.de/media/download/events/2010/gitews\\_riskmodeling/Updated%20Technical%20Documentation%20Hazard%20Map%20Bali%20english.pdf](http://nadine.helmholtz-eos.de/media/download/events/2010/gitews_riskmodeling/Updated%20Technical%20Documentation%20Hazard%20Map%20Bali%20english.pdf), 17. September 2010.
- DUTTA, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K. (2003): A mathematical model for floods loss estimation. In: *Journal of Hydrology* 277, S. 24-49.
- ELMER, F.; SEIFERT, I.; KREIBICH, H.; THIEKEN, A.H. (2010): A Delphi Method Expert Survey to Derive Standards for Flood Damage Data Collection. In: *Risk Analysis* 30 (1), S. 107-124.
- ELVERFELDT, K.; GLADE, T.; DIKAU, R. (2008): Naturwissenschaftliche Gefahren- und Risikoanalyse. In: FELGENTREFF, C.; GLADE, T. (Hrsg.): *Naturreisiken und Sozialkatastrophen*. Berlin, Heidelberg. S. 31-46.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. (2008): Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. In: *Engineering Geology* 102, S. 85-98.

- GAYER, G.; LESCHKA, S., NÖHREN, I.; LARSEN, O.; GÜNTHER, H. (2010): Tsunami inundation modelling based on detailed roughness maps of densely populated areas. In: *Natural Hazards Earth Sciences* 10, S. 1679-1687.
- GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM (GFZ) in der Helmholtz-Gemeinschaft. (2006): RI-MAX. Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse.
- GIARDINI, D.; BASHAM, P. (1993): The Global Seismic Hazard Assessment Program. In: *Annali di Geofisica* 36 (3-4), S. 3-13.
- GLADE, T.; STÖTTER, J. (2008): Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. In: FELGENTREFF, C.; GLADE, T. (Hrsg.): *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Berlin, Heidelberg, S. 151-163.
- GREIVING, S. (2006): Integrated risk assessment of multi-hazards: a new methodology. In: SCHMIDT-THOMÉ, P. (Hrsg.): *Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions*. Geological Survey of Finland, Special Paper 42, S. 75-82.
- GREIVING, S.; FLEISCHHAUER, M.; LÜCKENKÖTTER, J. (2006): A Methodology for an Integrated Risk Assessment of Spatially Relevant Hazards. In: *Journal of Environmental Planning and Management* 49 (1), S. 1-19.
- GRÜNTAL, G.; THIEKEN, A. H.; SCHWARZ, J.; RADTKE, K. S.; SMOLKA, A.; MERZ, B. (2006): Comparative Risk Assessments for the City of Cologne – Storms, Floods, Earthquakes. In: *Natural Hazards* 38, S. 21-44.
- HADMOKO, D. S.; LAVIGNE, F.; SARTOHADI, J.; HADI, P.; WINARYO (2008): Landslide hazard and risk assessment and their application in risk management and landuse planning in eastern flank of Menoreh Mountains, Yogyakarta Province, Indonesia. In: *Natural Hazards*, S. 1-20.  
<http://www.springerlink.com/content/g3167537r2k107q4/fulltext.pdf>, 6. Juli 2010.
- HAGEN, K. (2006): Rutschungen, eine verkannte Gefahr? In: *BFW-Praxisinformation* 12, S. 13-15.
- HAMZAH, L.; PUSPITO, N. T.; IMAMURA, F. (2000): Tsunami Catalog and Zones in Indonesia. In: *Journal of Natural Disaster Science* 22 (1), S. 25-43.

- HARJADI, P. (2008): Indonesia tsunami early warning system (InaTEWS): concept and implementation. International Workshop on Post Tsunami Soil Management, 1-2 July 2008, Bogor, Indonesia. S. 1-20.
- HEROLD, C.; MOUTON, F. (2006): Global Flood Modelling: Statistical Estimation of Peak-Flow Magnitude. World Bank Development Research Group. UNEP/GRID-Europe. S. 1-37.  
[http://www.grid.unep.ch/product/publication/download/article\\_global\\_flood\\_modeling.pdf](http://www.grid.unep.ch/product/publication/download/article_global_flood_modeling.pdf), 15. September 2010.
- HIDAYAT, F. (2009): Floods and climate change – observations from Java. Center for River Basin Organizations and Management, Solo, Central Java, Indonesia. CRBOM Small Publications Series No.10. S. 1-7.
- HINTERMAIER-ERHARD, G.; ZECH, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Systematik, Genese, Eigenschaften, Ökologie und Verbreitung von Böden. Stuttgart.
- HUABIN, W.; GANGJUN, L.; WEIYA, X.; GONGHUI, W. (2005): GIS-based landslide hazard assessment: an overview. In: Progress in Physical Geography 29 (4), S. 548-567.
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. (1988): Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11), S. 1593-1600.
- KUMPULAINEN, S. (2006): Vulnerability Concepts. In: Hazard And Risk Assessment. In: SCHMIDT-THOMÉ, P. (Hrsg): Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions. Geological Survey of Finland, Special Paper 42, S. 65-74.
- KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G.; SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde. Stuttgart.
- MARDIATNO, D.; KONGKO, W.; LAVIGNE, F.; SUNARTO; STÖTTER, J. (2008): GIS application for tsunami risk assessment in Cilacap, South Java – Indonesia. In: International Conference on Tsunami Warning (ICTW), Bali, Indonesia. 12.-14. November 2008. S. 1-8.
- MARFAI, M. A.; KING, L.; SINGH, L. P.; MARDIATNO, D.; SARTOHADI, J.; HADMOKO, D. S.; DEWI, A. (2008): Natural hazards in Central Java Province, Indonesia: an overview. In: Environmental Geology 56 (2), S. 335-351.

- MARZOCCHI, W.; MASTELLONE, M. L.; DI RUCCO, A.; NOVELLI, P.; ROMEO, E.; GASPARINI, P. (2009): Principles of multi-risk assessment. Interaction amongst natural and man-induced risks. European Commission. Research performed in the frame of Na.R.As (NATURAL RISKS ASSESSMENT). FP6 SSA Project: Contract No. 511264. S. 1-72.
- MEIGH, J. R.; FARQUHARSON, A. K.; SUTCLIFFE, J. V. (1997): A worldwide comparison of regional flood estimation methods and climate. In: *Hydrological Sciences Journal* 42 (2), S. 225-244.
- MERZ, B. (2006): Hochwasserrisiken. Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung. Stuttgart.
- MOLAS, G. L.; YAMAZAKI, F. (1994): Seismic macrozonation of the Philippines based on seismic hazard analysis. In: *Structural Engineering/Earthquake Engineering* 11 (1), S. 33s-43s.
- OLFERT, A.; GREIVING, S.; BATISTA, M. J. (2006): Regional multi-risk-review, hazards weighting and spatial planning response to risk – results from European case studies. In: SCHMIDT-THOMÉ, P. (Hrsg.): *Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions*. Geological Survey of Finland, Special Paper 42, S. 125-151.
- PETERSEN, M. D.; DEWEY, J.; HARTZELL, S.; MÜLLER, C.; HARMSSEN, S.; FRANKEL, A. D.; RUKSTALES, K. (2004): Probabilistic seismic hazard analysis for Sumatra, Indonesia and across the Southern Malaysian Peninsula. In: *Tectonophysics* 390, S. 141-158.
- PRINZ, H. (1997): Abriß der Ingenieurgeologie. Mit Grundlagen der Boden- und Felsmechanik, des Erd-, Grund- und Tunnelbaus sowie der Abfalldeponien. Stuttgart.
- QUINN, P. F.; BEVEN, K. J.; LAMB, R. (1995): The  $\ln(a/\tan\beta)$  index: how to calculate it and how to use it within the topmodel framework. In: *Hydrological Processes* 9, S. 161-182.
- RASTOGI, B. K.; JAISWAL, R. K. (2006): A Catalog of Tsunamis in the Indian Ocean. In: *Science of Tsunami Hazards* 25 (3), S. 128-142.
- RUNTUNUWU, E.; PAWITAN, H. (2008): Hydrometeorological monitoring network of Java Island and hydrologic characteristics of the major river basins. In: TANAKA, T. (Hrsg.): *International Workshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in*

- a Humid Tropical Region. JSPS-DGHE Joint Research Project, Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba, No. 8 Supplement, No. 2, S. 55-64.  
[http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/pdf\\_papers/tercbull08s2/t8supple2.pdf](http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/pdf_papers/tercbull08s2/t8supple2.pdf), 27. August 2010.
- SCHEFFERS, A. (2008): Tsunami. In: FELGENTREFF, C.; GLADE, T. (Hrsg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Berlin, Heidelberg, S. 173-180.
- SCHMINCKE, H.-U.; HINZEN, K.-G. (2008): Vulkanismus und Erdbeben. In: FELGENTREFF, C.; GLADE, T. (Hrsg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Berlin, Heidelberg, S. 141-150.
- SCHROTT, L.; GLADE, T. (2008): Frequenz und Magnitude natürlicher Prozesse. In: FELGENTREFF, C.; GLADE, T. (Hrsg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Berlin, Heidelberg, S. 133-140.
- SEIFERT, S. (2006): Quick Guide to Generation of Soil Topographic Index and monthly Saturation Probability maps in ArcGIS 9.1. A Product of "Developing GIS Water Quality Tools for Tompkins County". Technology Development Report. Cornell University. S. 1-10.
- SITHARAM, T. G.; GANESHA RAJ, K.; ANBAZHAGAN, P.; MAHESH, U. G. (2007): Use of Remote Sensing Data and Past Earthquake Events for Deterministic Seismic Hazard Analysis of Bangalore. International Conference of Earthquake Engineering, 8. & 9. September 2006, Pakistan. S. 290-297.  
[http://civil.iisc.ernet.in/~microzonation/index\\_files/NCW-5.pdf](http://civil.iisc.ernet.in/~microzonation/index_files/NCW-5.pdf), 20. August 2010.
- SPANGENBERGER, H. (2008): Risikoanalysen. Theorie und Praxis der qualitativen und quantitativen Risikoanalyse erläutert an Beispielen aus der Praxis. Beitrag zur Veranstaltung „Erfahrungsaustausch für §29a Sachverständige“, durchgeführt von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW) Baden-Württemberg am 22. und 23. April 2008.  
[http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/32343/09\\_Spangenberg.pdf?command=downloadContent&filename=09\\_Spangenberg.pdf](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/32343/09_Spangenberg.pdf?command=downloadContent&filename=09_Spangenberg.pdf), 26. Juli 2010.
- SPRANGER, M. (2009): September: Erdbeben in Indonesien. In: MUNICH RE (Hrsg.): Topics Geo. Naturkatastrophen 2009. Analysen, Bewertungen, Positionen, S. 22-23.
- SUBAGIO, H.; AMHAR, F. (2009): On Integrating of Multi-Hazard Mapping in Indonesia. In: GIS Development, Map Malaysia 2009, S. 1-7.

- TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L. ; RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1991) : On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. In: Hydrological Processes 5, S. 81-100.
- THIO, H. K.; SOMERVILLE, P.; ICHINOSE, G. (2007): Probabilistic Analysis of Strong Ground Motion and Tsunami Hazards in Southeast Asia. In: Journal of Earthquake and Tsunami 1 (2), 119-137.
- UHRICH, S.; KRAUSE, J.; BORMANN, H.; DIEKKRÜBER, B. (2002): Simulation von Überflutungen bei Hochwasserereignissen: Risikoeinschätzung und Unsicherheiten. In: STEPHAN, K.; BORMANN, H.; DIEKKRÜGER, B. (Hrsg.): Tagungsbericht 5. Workshop zur hydrologischen Modellierung: Möglichkeiten und Grenzen für den Einsatz hydrologischer Modelle in Politik, Wirtschaft und Klimafolgeforschung. Kassel. S. 59-70.
- UNISDR (2009): UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations, United Nations International Strategy for Disaster Reduction.  
<http://www.unisdr.org/eng/terminology/UNISDR-Terminology-English.pdf>, 13. August 2010.
- UNITED NATIONS UNIVERSITY (UNU) (1994): Cross-Impact Method – by Theodore Jay Gordon. A Publication of United Nations Development Program's (UNDP's) African Futures Project in collaboration with the United Nations University's Millenium Project Feasibility Study – Phase II.  
[http://www1.ximb.ac.in/users/fac/dpdash/dpdash.nsf/23e5e39594c064ee852564ae004fa010/2a7a6240bcf05ebde5256906000a7322/\\$FILE/Cross-im.pdf](http://www1.ximb.ac.in/users/fac/dpdash/dpdash.nsf/23e5e39594c064ee852564ae004fa010/2a7a6240bcf05ebde5256906000a7322/$FILE/Cross-im.pdf), 15. Juni 2010.
- USDA (2010): Keys to Soil Taxonomy. Eleventh Edition. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service.
- VAN WESTEN, C. J.; VAN ASCH, T. W. J.; SOETERS, R. (2006): Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment 65 (2), S. 167-184.
- VARNES, D. J. (1984): Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Published by the United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, S. 9-63.



- VAZE, J.; TENG, J.; SPENCER, G. (2010): Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. In: *Environmental Modelling & Software* 25, S. 1086-1098.
- VERMA, N.; RATHORE, N. S. (2002): Application of Remote Sensing and GIS in Earthquake Study "A Case Study of Bhuj Earthquake 2001". Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Section 1: Data Proceeding, Algorithm and Modelling, S. 1-5.
- VORLAUFER, K. (2009): Südostasien. Darmstadt.
- WACHAL, D. J.; HUDAK, P. F. (2001): Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA. In: *GeoJournal* 51, S. 245-253.
- WEGSCHEIDER, S.; POST, J.; ZOSEDER, K.; MÜCK, M.; STRUNZ, G.; RIEDLINGER, T.; MUHARI, A.; ANWAR, H. Z. (2010): Generating tsunami risk knowledge at community level as a base for planning and implementation of risk reduction strategies. Eingereicht bei: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010. S. 1-22.
- WHARTON, G.; TOMLINSON, J. J. (1999): Flood discharge estimation from river channel dimensions: results of applications in Java, Burundi, Ghana and Tanzania. In: *Hydrological Sciences Journal* 44 (1), S. 97-111.
- WIRTZ, A. (2009): Große Naturkatastrophen – Ursachen und Auswirkungen. In: MUNICH RE (Hrsg.): *Topics Geo. Naturkatastrophen 2009. Analysen, Bewertungen, Positionen*, S. 35-39.
- WISNER, B.; BLAIKIE, P.; TERRY, C.; DAVIS, I. (2006): *At Risk. Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. London, New York.
- YAMAZAKI, F.; MATSUOKA, M. (2006): Remote Sensing Technologies for Earthquake and Tsunami Disaster Management. Proceedings of the second Asia Conference on Earthquake Engineering, Manila, Philippines, Paper No. IA4, S. 1-20.  
[http://ares.tu.chiba-u.jp/~papers/paper/ACEE/ACEE2006-IA4\\_Yamazaki.pdf](http://ares.tu.chiba-u.jp/~papers/paper/ACEE/ACEE2006-IA4_Yamazaki.pdf), 20. August 2010.
- ZOSEDER, K.; POST, J.; STEINMETZ, T.; WEGSCHEIDER, S.; STRUNZ, G. (2009): Using Multi-Scenario Tsunami Modelling Results combined with Probabilistic Analyses to provide Hazard Information for the South-WestCoast of Indonesia. In: *Geophysical Research Abstracts* 11, S. 1-2.

## **Internetquellen**

### **KLIMADIAGRAMME**

[www.klimadiagramme.de](http://www.klimadiagramme.de),

16. August 2010

### **DARTHMOUTH OBSERVATORY**

<http://floodobservatory.colorado.edu/hydrography/E100S00.html>;

10. November 2010

### **EM-DAT (CRED)**

<http://www.emdat.be/>,

1. Oktober 2010

### **NOAA**

<http://www.ngdc.noaa.gov/>,

16. August 2010

<http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/gis/data.html>,

13. September 2010

### **USGS**

[http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical\\_country.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical_country.php),

16. August 2010

[http://earthquake.usgs.gov/learn-/topics/increase\\_in\\_earthquakes.php](http://earthquake.usgs.gov/learn-/topics/increase_in_earthquakes.php),

7. Oktober 2010

### **DIBI (BNPB)**

<http://dibi.bnbp.go.id/DesInventar/dashboard.jsp>,

1. Oktober 2010

### **EXBOOK**

[http://exbook.de/wp-content/uploads/2008/03/ln\\_funktion.png](http://exbook.de/wp-content/uploads/2008/03/ln_funktion.png),

13. September 2010

### **ENGINEERING TOOLBOX**

[http://www.engineeringtoolbox.com/flow-section-channels-d\\_965.html](http://www.engineeringtoolbox.com/flow-section-channels-d_965.html);

15. September 2010